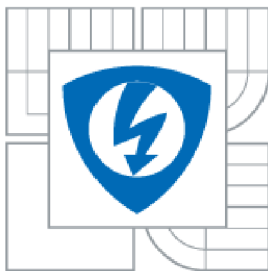




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

DYNAMICKÉ TESTOVÁNÍ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ

DYNAMIC TESTING OF SOLAR CELLS

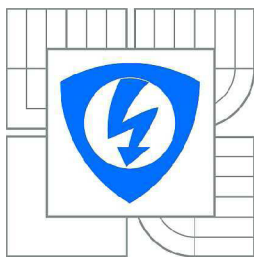
DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. RADIM ŠNEIDR

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

PROF. ING. JAROSLAV BOUŠEK, CSC.



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Mikroelektronika

Student: Bc. Radim Šneidr

ID: 70003

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Dynamické testování solárních článků

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s metodou dynamického testování solárních fotovoltaických článků a s metodikou hodnocení fotovoltaických článků na základě dvoudiodového modelu.

Obě metody ověřte při testování dodané série krystalických křemíkových fotovoltaických článků.

Výsledky porovnejte s parametry těchto článků určenými z frekvenční odezvy na osvětlení s proměnou vlnovou délkou a na buzení proudovými impulsy za temna.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: prof. Ing. Jaroslav Boušek, CSc.

prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt:

Náplní mé diplomové práce je ověření metody dynamického testování solárních fotovoltaických článků. Měřicí postupy pro určení jednotlivých parametrů náhradního schématu fotovoltaického článku byly ověřeny na základě testování sady krystalických křemíkových fotovoltaických článků. Pro zrychlení měření difúzní kapacity a zlepšení reprodukovatelnosti měření byl navržen nový způsob určení časové konstanty pro difúzní kapacitu, který využívá kombinace dvou krátkých pulsů. Pro toto měření byl navržen a realizován nový způsob časování dynamického testeru.

Abstract:

The content of this thesis is the validation of the method of dynamic testing of solar photovoltaic cells. Testing methods for determining the parameters of the photovoltaic cell replacement scheme has been verified through testing a set of crystalline silicon photovoltaic cells. To accelerate the diffusion capacity measurement and to improve reproducibility of the measurement we propose new method of determining the time constant for diffusion capacitance using a combination of two short pulses. For this method of measurement new scheme for dynamic tester timing has been proposed and implemented.

Klíčová slova:

Solární články, fotoelektrický jev, depletiční oblast, sériový odpor, svodový odpor, difúzní kapacita, bariérová kapacita, závěrné napětí.

Keywords:

Solar cells, photo-electric effect, depletion layer, serial resistance, leakage resistance, diffusion capacitance, barrier capacitance, breakdown voltage.

Bibliografická citace díla:

ŠNEIDR, R. *Dynamické testování solárních článků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 49 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jaroslav Boušek, CSc.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 26.5.2011

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Jaroslavu Bouškovi, CSc. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na diplomovou práci.

Obsah

1. Úvod.....	8
1.1. Princip fotovoltaického článku – PN přechod.....	8
1.2. Princip přeměny slunečního záření na elektrickou energii.....	9
1.2.1. Fotoelektrický jev.....	9
1.2.2. Energie fotonů.....	12
1.3. Druhy fotovoltaických článků.....	13
1.4. Technologie používané při výrobě fotovoltaických článků a jejich konstrukce.....	15
1.5. Využití fotovoltaických článků.....	16
2. Základy dynamického testování.....	17
2.1. Základy dynamického testování.....	17
2.2. Metoda testování solárních článků.....	20
2.3. Nevýhoda při měření solárních panelů – obtokové diody.....	21
3. Metodika pro hodnocení článků.....	22
3.1. Zjištění bariérové kapacity.....	22
3.2. Určení paralelního odporu.....	22
3.3. Měření sériového odporu.....	23
3.4. Závěrné napětí přechodu.....	23
3.5. Doba života minoritních nosičů na odezvu proudovými impulsy	24
3.6. Doba života minoritních nosičů z odezvy na světelné impulsy.....	25
4. Experimentální měření solárního článku.....	26
4.1. Měření solárního článku v propustném směru.....	26
4.2. Měření bariérové kapacity.....	29
4.3. Měření závěrného napětí solárního článku.....	31
5. Metoda měření pomocí dvoudiodového modelu.....	32
6. Měření solárních článků firmy Solartec s.r.o.....	35
6.1. Časová odezva solárních článků – bariérová kapacita a svodový odpor.....	35
6.2. Časová odezva na sestupnou hranu napěťového impulsu.....	36
6.3. Závěrné vlastnosti článků.....	38
6.4. Zhodnocení testu článků Solartec	39
7. Dynamické testování solárních článků buzených proudovými impulsy s proměnnou frekvencí.....	40
7.1. Modifikace testeru pro řízení proměnné frekvence proudových pulsů	40
7.1.1. Realizace panelu testeru.....	42
7.2. Měření solárních článků pomocí upraveného budicího signálu.....	42
8. Závěr.....	46
9. Seznam použité literatury.....	48

Seznam obrázků

Obr.1.1	Struktura solárního článku.....	10
Obr.1.2	Energetické hladiny solárního článku.....	11
Obr.1.3	Spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou.....	13
Obr.1.4	Řez běžného fotovoltaického panelu (převzato z [5]).....	15
Obr.2.1	Náhradní schéma solárního článku (převzato z [3]).....	17
Obr.2.2	Závislost difúzní a bariérové kapacity.....	19
Obr.2.3	Blokové schéma měřicího zařízení (převzato z [3]).....	20
Obr.2.4	Zapojení obtokových diod.....	21
Obr.3.1	Blokové schéma pro měření bariérové kapacity (šířky přechodu).....	22
Obr.3.2	Časový průběh napětí po vypnutí proudu.....	23
Obr.3.3	Blokové schéma pro měření závěrného napětí.....	24
Obr.3.4	Blokové schéma pro zjištění doby života minoritních nosičů.....	24
Obr.3.5	Blokové schéma pro zjištění doby života minoritních nosičů (pro LED).....	25
Obr.4.1	Určení sériového odporu a tečny pomocí dvou blízkých bodů (převzato z [7])...26	
Obr.4.2	Průběh solárního článku 1 v propustném směru.....	27
Obr.4.3	Průběh solárního článku 2 v propustném směru.....	28
Obr.4.4	Průběh solárního článku 1 pro výpočet bariérové kapacity.....	29
Obr.4.5	Průběh solárního článku 2 pro výpočet bariérové kapacity.....	29
Obr.4.6	Průběh závěrného napětí 26 V.....	31
Obr.5.1	Ekvivalentní obvod solárního článku (převzato z [8]).....	32
Obr.5.2	Semi-logaritmický graf A – V křivky převzato z [8].....	33
Obr.6.1	průběh doby života minoritních nosičů.....	37
Obr.6.2	Závěrné napětí – AV charakteristiky.....	38
Obr.7.1	Schéma modifikovaného obvodu.....	41
Obr.7.2	Schéma modifikovaného obvodu.....	41
Obr.7.3	Přístrojový panel testeru.....	42
Obr.7.4	Testovací články.....	43
Obr.7.5	Grafické znázornění průběhu vybíjení solárního článku.....	43
Obr.7.6	Reálný průběh vybíjení solárního článku.....	44

Seznam tabulek

Tab.6.1 Naměřené hodnoty časové odezvy a bariérové kapacity.....	35
Tab.6.2 Časové odezvy a závěrné napětí	36
Tab.7.1 Naměřené časové konstanty τ	45

1. Úvod

Solární (též fotovoltaické) články jsou v dnešní době významným prvkem pro výrobu elektrické energie. Princip spočívá v přeměně energie slunečního záření na energii elektrickou. Využívá se při tom tzv. fotovoltaický jev [1], při kterém se díky energii elektromagnetického záření uvolňují z polovodičového materiálu elektrony.

1.1. Princip fotovoltaického článku – PN přechod

Fotovoltaický článek je v podstatě velkoplošná polovodičová součástka skládající se z polovodiče typu N a P, jejímž základním stavebním prvkem je nejčastěji křemík. Ten se upravuje a čistí chemickou cestou, při které se dosahuje potřebné čistoty pro výrobu článků. Difúzí příměsí se pak získává potřebný typ polovodiče, tedy polovodič typu P, který je dotován třímocným prvkem (majoritními nosiči jsou kladné díry) a polovodič typu N, dotován pětímocným prvkem (majoritními nosiči jsou volné elektrony). Obvykle se jako substrát používá polovodič typu P, ve kterém se vytvoří vrstva typu N, čímž vzniká požadovaný přechod PN.

Chování tohoto přechodu lze zkoumat bez nebo s přiloženým vnějším napětím. U PN přechodu bez přiloženého napětí vlivem koncentračního spádu na rozhraní oblastí P a N začnou volné elektrony difundovat z polovodiče typu N do polovodiče typu P, a zároveň difundují kladné díry směrem opačným. Za rozhraním začnou tyto elektrony a díry vzájemně rekombinovat. Tímto mechanismem vznikne v místě přechodu v oblasti P záporná a v oblasti N kladná oblast bez volných nosičů.

Tato oblast se nazývá depletiční neboli ochuzená oblast a bývá označována i jako oblast prostorového náboje. Šířka této oblasti je závislá na koncentraci donorů a akceptorů. U solárních článků je tato oblast nesouměrná, protože přechod článku, a tím i oblast prostorového náboje, se rozšíří do méně dotované oblasti, viz. podmínka nábojové neutrality [2] a [4].

Díky ionizovaným donorům a akceptorům v depletiční oblasti vzniká silné elektrické pole, které brání další difúzi elektronů a děr, což znamená, že v podstatě vyvolává zpětný driftový tok až do doby, kdy se difúzní a driftové toky ustálí. Tím vznikne dynamická rovnováha. Vlivem prostorového náboje vzniká mezi oblastmi P a N difúzní napětí U_D .

Napětí U_D lze vyjádřit takto :

$$U_D = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \quad (1)$$

kde k - Boltzmanova konstanta ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

T - termodynamická teplota

q - absolutní hodnota náboje

N_D, N_A - koncentrace příměsí (akceptorů a donorů)

n_i^2 - intrinziční koncentrace nosičů

Přiložíme-li na PN přechod napětí v propustném směru, začne se potenciál na přechodu vlivem externího napětí U snižovat na hodnotu $(U_D - U)$, a tím se samozřejmě zužuje i oblast prostorového náboje. V energetické rovině se původní potenciálová bariéra (qU_D) začne snižovat a elektrony a díry s vyšším potenciálem začnou procházet přes PN přechod. Jinak řečeno, vzniká injekce majoritních elektronů z N do P oblasti, ve kterých se z nich stávají minoritní nosiče. Analogicky tento děj platí i pro majoritní kladné díry. Se zvyšováním hodnoty přiloženého napětí až do $U_D = U$ zaniká ochuzená vrstva (její šířka klesne na nulu), a tím i potenciálová bariéra, čímž se energetické hladiny vyrovnají. Nosiče elektrického náboje tedy procházejí přes PN přechod. Z makroskopického hlediska elektrický proud prudce vzrůstá a napětí se téměř nemění.

Přiložíme-li však na PN přechod napětí v závěrném směru, začne se potenciálová bariéra zvyšovat na hodnotu odpovídající $q(U_D + |U|)$. Elektrické pole, které brání nosičům průchodu přechodem, se zvětšuje. Depleční vrstva se v tomto režimu chová jako dielektrikum, což má za následek vznik bariérové kapacity, která je popsána níže.

1.2. Princip přeměny slunečního záření na elektrickou energii

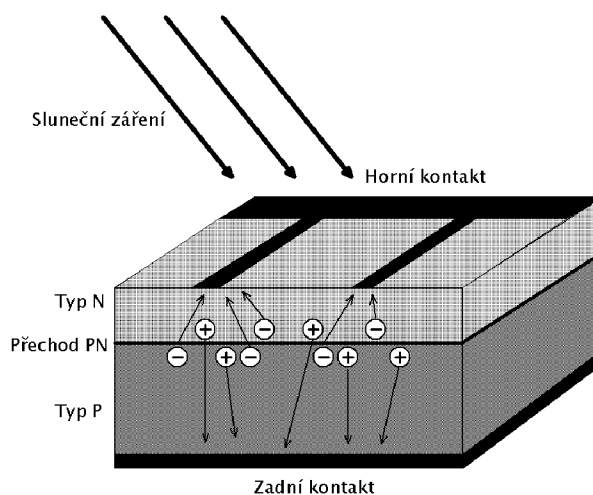
1.2.1. Fotoelektrický jev

Jak již bylo uvedeno výše, u solárních článků se využívá fotoelektrického jevu,

přičemž existují dva druhy, a to vnitřní a vnější fotoefekt. Při vnějším fotoefektu vzniká fotoemise pouze na povrchu materiálu, čímž se emitované elektrony díky dopadajícímu slunečnímu záření (fotonům) uvolňují do okolí.

Pro výrobu elektrické energie u solárních článků se však používá vnitřní fotoelektrický jev, kdy fotony dopadající na PN přechod uvolňují elektrony z krystalické mřížky atomů, na jejichž místě tak vznikají neobsazené stavy (díry), do kterých pak mohou vstoupit jiné elektrony a dochází tak ke vzniku vodivosti uvnitř materiálu. Tento proces je zobrazen obr.1.1.

Díky vnitřnímu elektrickému poli na PN přechodu jsou tyto elektrony a kladné díry rozděleny tak, že záporné náboje (elektrony) se přesunují do oblasti typu N a kladné náboje (díry) do oblasti typu P. Tímto mechanismem vzniká na přechodu napětí. Uzavřeme-li tento článek do obvodu s nějakým spotřebičem, začne obvodem procházet stejnosměrný elektrický proud. Aby byla účinnost co největší, musí být PN přechod umístěn kolmo na dopadající sluneční záření. Každý fotovoltaický článek je vybaven horním kontaktem, jenž je vakuově napařen ve formě hřebínků nebo mřížky tak, aby byl rozprostřen rovnoměrně po celé ploše, ale zároveň, aby co nejméně zakrýval plochu pro dopadající sluneční záření. Spodní kontakt je též napařen, avšak po celé ploše článku.



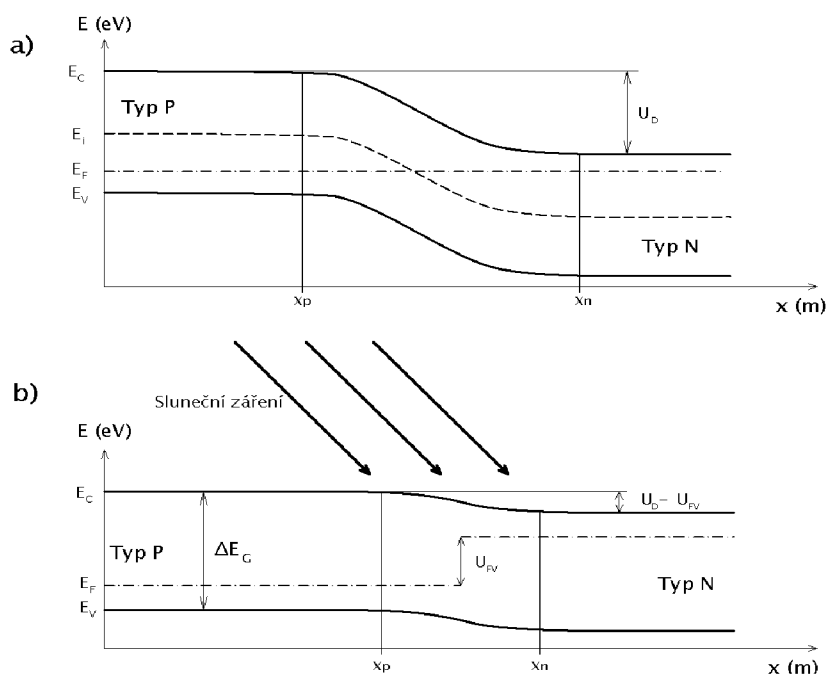
Obr.1.1 Struktura solárního článku

Z pohledu energetických pásů (pásová struktura) lze tento proces lépe popsat následovně. Na obr.1.2a je vidět zakřivení jednotlivých energetických pásů PN přechodu při neosvětleném solárním článku. Zakřivení vodivostního pásu E_C a valenčního pásu E_V je

způsobeno vlivem koncentračního spádu, jak už bylo uvedeno v odstavci 1.1. Na obrázku je také vyznačen intristický pás E_i a Fermiho hladina E_f , podle které se v podstatě určuje pravděpodobnost obsazení energetické hladiny elektronem příslušného typu polovodiče [4]. Je důležité upozornit, že neosvětlený solární článek funguje jako polovodičová dioda s klasickým PN přechodem.

Pokud solární článek osvětlíme, dopadající kvanta fotonů na PN přechod vyvolají generaci párů elektron-díra, které jsou díky silnému elektrickému poli urychlovány do jednotlivých oblastí P a N, tedy elektrony do N a kladné díry do P oblasti. To se projeví i na schématu energetických hladin článku viz. obr.1.2b. Díky narůstajícímu elektrickému poli vzniká v oblasti přechodu rozdíl potenciálů – napětí fotovoltaického článku U_{FV} , které se projeví rozdílem Fermiho hladin. Vzniklé napětí sníží potenciál na přechodu z hodnoty odpovídající difúznímu napětí na hodnotu odpovídající rozdílu $U_D - U_{FV}$.

Maximální napětí solárních článků z krystalického křemíku je přibližně $U_{FV} \approx 0,6V$. Při tomto napětí se v pásovém diagramu projeví vyrovnání energetických hladin a oblast prostorového náboje zanikne. Pokud bychom zvyšovali intenzitu osvětlení, napětí bude téměř stejné. Je to dáno tím, že zaniká oblast prostorového náboje v důsledku zvyšování koncentrace elektronů a děr. Tento jev lze vysvětlit i tak, že snižující se difúzní napětí vede ke zvýšení rekombinačního procesu, a tím ke snižování difúzního toku do oblastí P a N. Tyto dva proudy se nakonec vyrovnají až jejich rozdíl bude nulový.



Obr.1.2 Energetické hladiny solárního článku

Pokud na fotovoltaický článek připojíme nějaký spotřebič nebo ho zapojíme do elektrického obvodu, dojde k okamžitému, avšak relativně malému snížení napětí U_{FV} a následnému zakřivení energetických pásů, tedy ke zvýšení potenciálové bariéry. To má za následek snížení rekombinačního procesu (proudu), který byl u článku bez zátěže a ke zvýšení toku nábojů do kvazineutrálních oblastí. Výsledný rozdíl obou proudů již není nulový a jejich rozdíl je výsledným proudem dodávaným do zátěže.

Optimální napětí při zatížení na osvětleném solárním článku je $U_{FV} \approx 0,5$ V, což je přirozeně malé. Abychom dostali napětí, které lze prakticky využít, zapojují se články zpravidla do série, a to po 36 nebo 72 modulech. Tím získáme výsledné napětí 18 V, resp. 36 V. Tyto moduly se řadí v sério-paralelní kombinaci - podle toho, jaké napětí nebo proud potřebujeme.

1.2.2. Energie fotonů

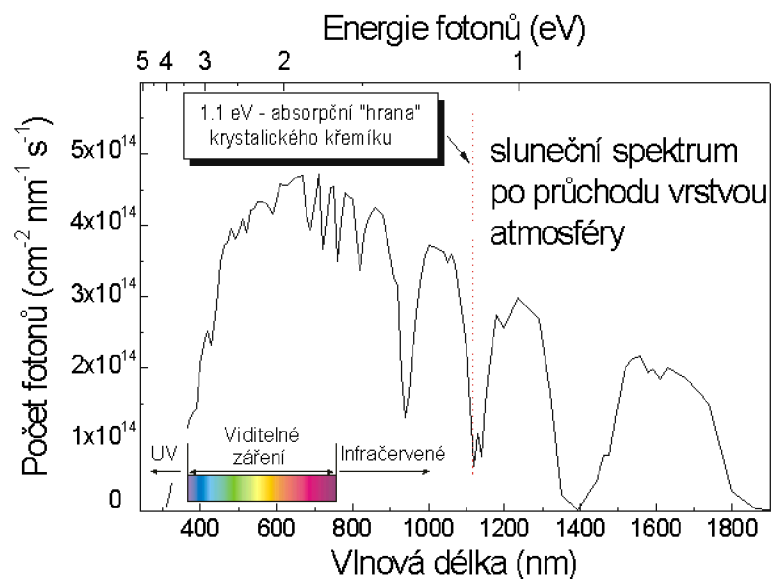
Kvantem fotonů je myšleno elektromagnetické záření [1] určité vlnové délky, jehož zdrojem je slunce. Aby vznikl fotoelektrický jev, je zapotřebí fotonů, které musí mít energii rovnou nebo větší než je energie zakázaného pásu PN přechodu. Šířka zakázaného pásu energií je u křemíkového solárního článku $\Delta E_G \approx 1,12$ eV. Z toho vyplývá, že minimální potřebná energie fotonů odpovídá vlnové délce $\lambda \geq 1100$ nm. Pro větší energii musí být vlnová délka kratší, což také dokazuje jednoduchý vztah :

$$E = h \cdot \nu = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{E} = \frac{6,26 \cdot 10^{-34} \cdot 2,998 \cdot 10^8}{1,12 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}} = 1,05 \cdot 10^{-6} \text{ m} , \quad (2)$$

kde h - Planckova konstanta ($6,26 \cdot 10^{-34}$ J.s)

c - rychlost světla ($2,998 \cdot 10^8$ m.s⁻¹).

Na obr.1.3 je znázorněno spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou. Je také vyznačena hranice, od které foton dosahuje hodnotu $\Delta E_G \approx 1,12$ eV. Největší citlivost křemíkových solárních článků je na fotony, jejichž vlnová délka se pohybuje v rozmezí vlnových délek $\lambda \approx 600 - 700$ nm.



Obr.1.3 Spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou

Fotony mající větší energii než 1,12 eV (tedy s kratší vlnovou délkou než 1,1 mm) způsobují u křemíkových solárních článků jejich zahřívání. Je to dáno tím, že energie těchto fotonů způsobí generaci elektronů, ale zbytek energie, nebo spíše přebytek, se mění v tepelné kmity krystalické mřížky křemíku. To je také hlavní příčina omezení účinnosti článků, která se pohybuje v dnešní době okolo 10 – 20 % u sériové výroby. U laboratorních článků je tato účinnost přibližně 30 %. Zahřívání článků se negativně projevuje na výkonu, který článek dodává do zátěže. U článků vyrobených na bázi krystalického křemíku se se zvětšující se teplotou snižuje napětí, a zároveň roste proud nakrátko.

1.3. Druhy fotovoltaických článků

V dnešní době existuje mnoho druhů fotovoltaických článků. Jedním z nejběžnějších jsou solární články na bázi krystalického křemíku, kde jako hlavní nosný prvek je křemíkový substrát, zpravidla typu P. Tloušťka bývá kolem 0,2 mm a je snahou ji stále snižovat. Tyto články se vyrábí z čistého monokrystalického nebo polykrystalického křemíku.

Monokrystalické solární články, které se někdy také označují jako články první generace, jsou tvořeny tenkými destičkami monokrystalického křemíku ve tvaru osmiúhelníku nebo častěji čtverce. Vyznačují se relativně vysokou a dlouhodobou účinností

v rozmezí 13 – 17 %, avšak jejich nevýhodou je nákladná výroba díky velké spotřebě čistého křemíku a energetické náročnosti při výrobě. Přesto jsou tyto články zatím stále nejpoužívanější zejména pro velkovýrobu elektrické energie v solárních elektrárnách.

Polykrystalické solární články jsou často tvořeny modře zbarvenými destičkami ve tvaru obdélníku nebo čtverce, což se pozitivně projevuje v lepším využití plochy. Jejich účinnost je však o něco menší než u monokrystalických článků, typicky mezi 12 – 15 %. Je to díky odlišné výrobní technologii (viz. kap. 1.4.), která činí tyto články na druhou stranu levnějšími oproti monokrystalickým článkům.

Dále existují články amorfni, patřící mezi tzv. tenkovrstvé články, jejichž nosný substrát tvoří např. skleněné desky nebo plastové či kovové pružné fólie. Tloušťka vrstvy polovodiče naneseného na substrát je řádově několik mikrometrů. Z toho plyne, že amorfni články mohou být několikrát tenčí než články na bázi krystalického křemíku, a tedy velmi úsporné na spotřebu materiálu pro jejich výrobu. Účinnost těchto článků je však relativně nestabilní a časem rychleji klesá. V dnešní době se jejich účinnost pohybuje běžně kolem 10 %, což je podstatně menší než u monokrystalických a polykrystalických článků. Nesporné jsou ale jejich výhody jako je pružnost, ohebnost apod.

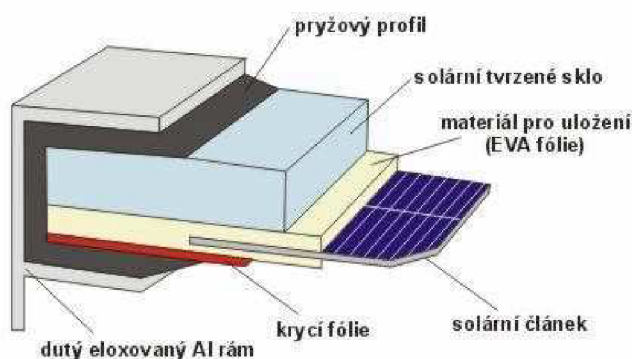
V poslední době jsou vyvíjeny tzv. několikavrstvé kompozitní články spočívající na efektivním využití širšího spektra slunečního záření. Jednotlivé vrstvy fotovoltaického článku tak využívají světlo v určitém rozsahu vlnové délky. Pokud vrstva, na kterou dopadá záření určité vlnové délky, nemůže využít tuto energii, propustí ji do hlubších vrstev, ve kterých je využita.

Existují také už i systémy, které nevyužívají klasický PN přechod, jak byl popsán výše. Jedná se např. o polymerní nebo fotogalvanické články využívající jiné materiály než polovodiče. Ovšem díky jejich malé účinnosti, životnosti a stabilitě zatím tyto solární články nenašly své uplatnění.

Pro dosažení co největšího výkonu solárních článků, je zřejmé, že musíme zajistit co největší generaci výstupního proudu, co nejmenší hodnoty kontaktního odporu a co největší hodnoty svodového odporu (viz. kap. 2). Nejvyššího stupně generace výstupního proudu dosáhneme konstrukcí a povrchovou úpravou solárních článků tak, aby na PN přechod mohlo dopadat světelné záření beze ztrát. To je zajištěno např. standardní antireflexní vrstvou (SiN_4), která zároveň slouží jako pasivace.

1.4. Technologie používané při výrobě fotovoltaických článků a jejich konstrukce

Při výrobě fotovoltaických článků jsou používány různé technologie. Jedna z nejpoužívanějších technologií, při které je dosaženo potřebné čistoty křemíku, je tzv. technologie Siemens s chlоровým cyklem [6]. Tato metoda je však náročná na spotřebu energie, a tudíž i cenu čistého křemíku, proto se vyvíjejí technologie, kde se chlоровý cyklus nepoužívá. Po dosažení potřebné čistoty křemíku je zapotřebí z něj vyrobit tzv. polykrystalické nebo monokrystalické ingoty. Polykrystalické ingoty jsou odlévány do formy, kdežto monokrystalické jsou tzv. taženy z tavné pece. Takto vyrobený křemík se pak řeže na velmi tenké destičky (řádově až 100 μm), které tvoří hlavní substrát pro výrobu solárních článků.



Obr.1.4 Řez běžného fotovoltaického panelu (převzato z [5])

Samotná konstrukční výroba finálních článků je pak zobrazena na obr.1.4. Při konstrukci se jako první použije temperované sklo (velmi tvrdé – odolné proti kroupám), na které se pokládá tzv. EVA (etylvinylacelát) plastová fólie. Pak se pokládají připravené solární články a na ně opět plastová fólie. Zadní stěnu tvoří laminátová stěna. Poté se panel zahřívá na teplotu tavení EVA fólie tak, aby dokonale zalila prostor mezi článkem, sklem a laminátovou stěnou. Nakonec se tyto panely ukládají do kovových rámců.

1.5. Využití fotovoltaických článků

Využití fotovoltaické energie je v dnešní době velmi rozmanité. Díky obrovské poptávce se posunula technologie výroby výrazně kupředu, což mělo za následek snížení cen článků během posledních 5-ti let v průměru téměř o 50%. Nutno dodat, že za vzrůstajícím počtem solárních elektráren stojí rovněž státní dotace.

První využití solárních článků bylo pro vesmírné účely a kosmonautiku. Koncem osmdesátých let minulého století se však solární systémy začaly objevovat i v běžném životě. V dnešní době se solární články samozřejmě nejvíce využívají pro výstavbu velkých solárních elektráren, u kterých se používají zejména monokrystalické články. Elektrárny s relativně malým výkonem (rodinné domy apod.) využívají různé druhy článků, nejčastěji polykrystalické křemíkové články.

Fotovoltaika se také velmi často využívá pro tzv. ostrovní fotovoltaické systémy, které představují malé zdroje elektrické energie. Tyto systémy se nejvíce používají například jako zdroje pro menší objekty, jako jsou chaty nebo zahradní osvětlení, dopravní signalizace, parkovací automaty ve městech, telekomunikační zařízení a nebo také pro monitorovací přístroje umístěné v terénu.

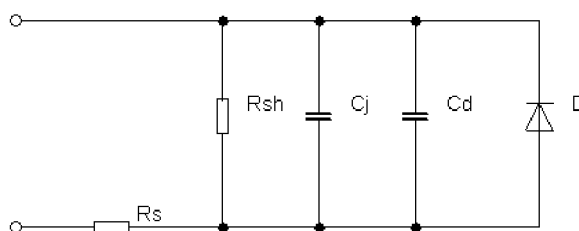
Amorfni solární články se díky své zatím relativní nevýhodě (nižší účinnost a stabilita) používají často u hodinek, kalkulaček apod. Dnes se často setkáváme i s mobilní fotovoltaikou, která se používá pro nabíjení různých malých spotřebičů, jako jsou mobilní telefony, kamery, fotoaparáty apod. Díky tomu, že solární články fungují absolutně bezhlučně, najdou své velké uplatnění i v armádě.

2. Základy dynamického testování

2.1. Základy dynamického testování

Dynamickým testováním solárních článků zjišťujeme kvalitu, a zároveň i jejich účinnost. Jako základ náhradního schématu pro metodu testování článků budeme brát polovodičovou diodu.

Metoda dynamického testování spočívá na odezvě solárního článku na rychlé přechodové jevy. Díky těmto podnětům získáme informace o kvalitě použitého materiálu, resp. rekombinačních procesech, kontaktním a svodovém odporu, difúzní kapacitě, geometrické kapacitě a neméně důležitém závěrném napětí. Pro popis těchto vlastností použijeme již zmíněné náhradní zapojení solárního článku (obr.2.1).



Obr.2.1 Náhradní schéma solárního článku (převzato z [3])

- kde R_s - sériový (kontaktní) odpor
 R_{sh} - svodový odpor
 C_j - geometrická (bariérová) kapacita
 C_d - difúzní kapacita
 D - ideální dioda

Sériový odpor R_s v náhradním schématu zde představuje ztrátu, která se projevuje kvalitou úzkých vodivých spojů na horní ploše článku (polovodič typu N) vytvořených sítotiskem a vodivou stříbrnou mřížkou potaženou na spodním substrátu typu P (křemík Si s příměsí bóru B).

Svodový odpor R_{sh} je dán podle použité technologie výroby, a tedy kvalitou povrchové úpravy. Vzniká u něj tzv. povrchová rekombinace [2] způsobená různými defekty a nečistotami na povrchu polovodiče. Z náhradního schématu je zřejmé, že na hodnotě svodového odporu záleží proto, že tvoří RC člunek spolu s difúzní a bariérovou kapacitou nebo s kombinací obou kapacit.

Difúzní kapacita C_D převažuje v propustném směru a je dána vztahem:

$$C_D = \frac{dQ_{ap}}{dU} \approx \frac{I}{U_T} \tau_p \quad (3)$$

kde Q_{ap} - náboj akumulovaných nosičů

U - přiložené napětí (v propustném směru)

I - proud diodou

U_T - teplotní napětí (přibližně 0,026 V při teplotě $T = 300$ K)

τ_p - doba života minoritních nosičů

Je zřejmé, že difúzní kapacita je přímo úměrná časové konstantě, která představuje dobu života nadbytečných minoritních nosičů v kvazineutrálních oblastech, do kterých jsou nosiče injikovány při průchodu proudem I v propustném směru. Je nutné podotknout, že velikost difúzní kapacity roste přibližně exponenciálně s narůstajícím napětím.

Geometrická nebo-li bariérová kapacita C_J převládá v závěrném směru. Její velikost je závislá zejména na geometrických rozměrech přechodu PN a na přiloženém napětí U . V podstatě se jedná o kondenzátor, jehož dielektrikum tvoří depletiční oblast (oblast prostorového náboje) a velikost se mění v závislosti na přiloženém napětí, které tuto oblast rozšiřuje nebo naopak zužuje. Pro nejjednodušší model diody, představovaný strmým přechodem, bariérovou kapacitu vypočítáme podle vztahu [2] :

$$C_J = \varepsilon A \left[\frac{q}{2\varepsilon} \cdot \frac{1}{(U_D - U)} \cdot \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right]^{1/2} \quad (4)$$

kde ε - permitivita polovodiče

A - velikost plochy PN přechodu

q - náboj elektronu

U_D - difúzní napětí

U - vnější přiložené napětí

N_A, N_D - koncentrace příměsí (akceptorů a donorů)

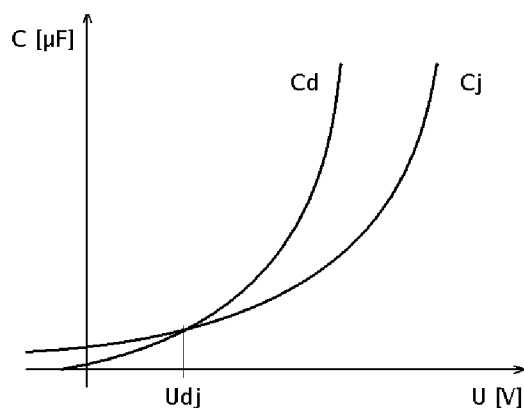
Je nutné si ale uvědomit, že u solárních článků tvoří velkou část substrát typu P, tedy základní deska, na kterou se napařuje tenká vrstva polovodiče typu N. Pak je tedy zřejmé, že pro koncentraci příměsí platí, že $N_D \gg N_A$. Z toho lze vztah (3) zjednodušit na :

$$C_j = \varepsilon A \left[\frac{q}{2\varepsilon} \cdot \frac{1}{(U_D - U)} \cdot \frac{1}{N_A} \right]^{1/2} \quad (5)$$

Celková kapacita daného PN přechodu, resp. solárního článku je dána součtem obou kapacit :

$$C = C_D + C_J \quad (6)$$

Pokud vložíme přibližnou závislost obou kapacit na přiloženém napětí do jednoho grafu (obr.2.2), zjistíme, že velikost bariérové kapacity převládá jen do určitého bodu (U_{Dj}). Při nízkých hodnotách napětí převládá bariérová kapacita až do té doby, kdy začne převládat difúzní kapacita. Je to dáno dobou života minoritních nosičů.



Obr.2.2 Závislost difúzní a bariérové kapacity

Velikost napětí U_{Dj} , kdy jsou obě kapacity na stejné úrovni, závisí na šířce depletiční

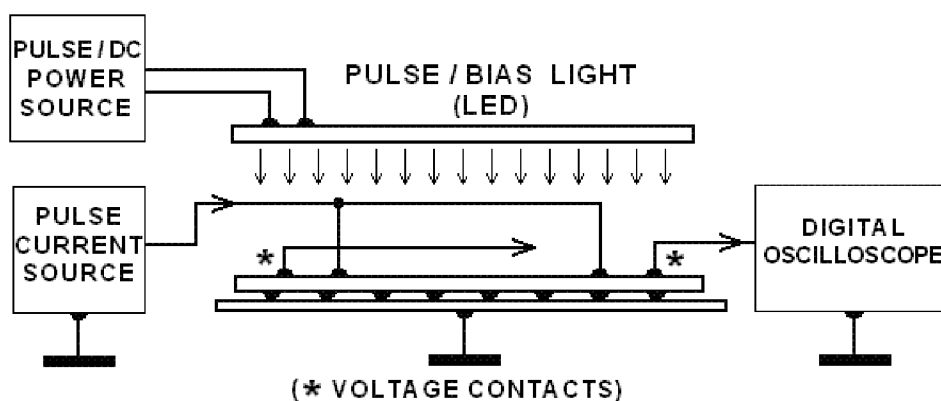
oblasti. Hodnota U_{DJ} u solárních článků se pohybuje kolem 350 mV. Díky velkým koncentracím příměsí je ochuzená oblast úzká, což se projevuje poměrně vysokou hodnotou bariérové kapacity. Pro dynamické testování je jedním z prvků měření (odhadnutí) relaxační doby, resp. doby života minoritních nosičů v kvazineutralní oblasti. Ta závisí na velikosti difúzní kapacity, tedy až při vyšších hodnotách U_{DJ} , kdy se začne projevovat.

Dalším důležitým parametrem je měření závěrného napětí, kdy zjišťujeme velikost tohoto napětí. Závěrné napětí je závislé především na kvalitě přechodu, tzn. na jeho nehomogenitě nebo šířce depletiční oblasti. Přiložíme-li závěrné napětí na článek, bude se s narůstající intenzitou zvyšovat kinetická energie minoritních nosičů procházejících depletiční vrstvou (depletiční oblast je širší než je střední volná dráha elektronu) až do doby, kdy jejich kinetická energie překročí hranici, při které dochází k nárazové ionizaci atomů, čímž vzniká generace elektron – díra. Ta má za následek téměř okamžitý (lavinovitý) nárůst koncentrace nosičů vystupujících z ochuzené oblasti. Tento jev se nazývá lavinový průraz, jehož následek se projevuje velkým a strmým nárůstem závěrného proudu. Z toho vyplývá, že při měření závěrné charakteristiky testujeme lavinové vlastnosti článku.

Nesmíme zapomenout, že lavinový průraz není sám o sobě destruktivní. U některých článků je však vlivem poruch a nečistot závěrný proud tak velký, že se výrazně zvyšuje teplota článku a může dojít ke zničení přechodu.

2.2. Metoda testování solárních článků

Metoda dynamického testování je v podstatě jednoduchá a nevyžaduje speciální přístroje. Kvalita testovaných solárních článků je vyhodnocena pomocí odezvy na rychlé proudové a napěťové impulsy.



Obr.2.3 Blokové schéma měřícího zařízení (převzato z [3])

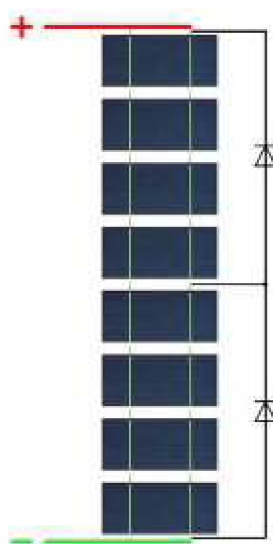
Na obr.2.3 lze vidět uspořádání pracoviště pro dynamické testování fotovoltaických článků. Veškeré měření může být prováděno pomocí počítače nebo také manuálně, přičemž vyhodnocení je zpracováváno pomocí tabulkového editoru excel.

Měření je prováděno za temna nebo při osvětlení pomocí 10 x 10 LED panelu (viz. obr.2.3), se kterým lze pracovat ve stejnosměrném nebo i pulsním napájení. LED panel zajistí velmi rychlé osvětlení či vypnutí, díky kterému lze zjišťovat dobu života minoritních nosičů (viz kap. 3.6.). Také je zde nutné podotknout, že LED nezahřívá měřený článek, což je žádoucí.

Pracoviště je připraveno pro vzorky o velikosti 100 x 100 mm. Je zde použito čtyřvodičové napájení proto, aby byly odděleny proudové a napěťové kontakty. Výsledné odezvy se zaznamenávají pomocí digitálního osciloskopu.

2.3. Nevýhoda při měření solárních panelů – obtokové diody

Velkou nevýhodou testování účinnosti solárních panelů, jakožto souboru sérioparalelního zapojení solárních článků, jsou tzv. obtokové diody. Tyto diody slouží k ochraně článků před poškozením – přepólováním do závěrného směru a také před poškozením, které může vzniknout např. zastíněním části panelu, což způsobí zahřívání a možné následné zničení článku. Proto se z pravidla ke každému článku paralelně zapojují výkonové Schotkyho diody v závěrném směru. Názorné zapojení je zobrazeno na obr.2.4.

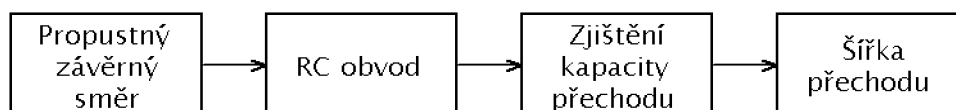


Obr.2.4 Zapojení obtokových diod

3. Metodika pro hodnocení článků

3.1. Zjištění bariérové kapacity

Jak již bylo řečeno, bariérová (geometrická) kapacita se uplatňuje zejména při přiložení závěrného napětí. V propustném stavu se bariérová kapacita uplatňuje jen do malých hodnot napětí, při kterých je geometrická kapacita větší než kapacita difúzní. Geometrická kapacita tvoří RC článek společně se svodovým (paralelním) a sériovým odporem. Při dynamickém testování se článek budí přes externí dělič napětí ovými pravoúhlými impulsy. Na obr.3.1 můžeme vidět blokové schéma zapojení pro měření dané kapacity a zjištění šířky přechodu.



Obr.3.1 Blokové schéma pro měření bariérové kapacity (šířky přechodu)

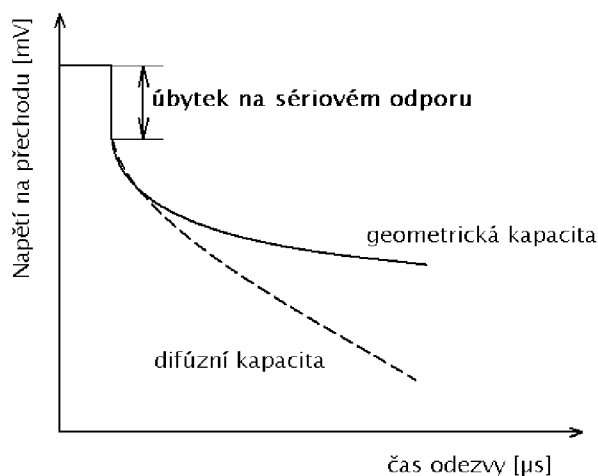
Ze zjištěné bariérové kapacity lze určit také šířku depletiční oblasti. Z experimentálních měření bylo zjištěno, že u standardních křemíkových článků s rozměry 100 x 100 mm se hodnota geometrické kapacity rovná přibližně $C_j \approx 5 \mu\text{F}$ a šířka depletiční oblasti je asi 200 nm.

3.2. Určení paralelního odporu

Paralelní (svodový) odpor R_{sh} je určen pomocí relaxační konstanty při nízkém napětí, kdy převládá geometrická kapacita. Při dynamickém testování se k tomuto měření využívá napětíových impulsů pravoúhlého tvaru. Maximální amplituda těchto impulsů je 40 mV. Podobnou hodnotu lze určit i z AV charakteristiky za temna, kdy je na článku téměř nulové napětí. Typická hodnota u kvalitních fotovoltaických článků s rozměry 100 x 100 mm je větší než 400 Ω .

3.3. Měření sériového odporu

Měření sériového odporu R_s je prováděno pomocí odezvy na proudové impulsy v propustném směru. Je to okamžitá odezva po vypnutí proudu článkem, kdy napětí na článku okamžitě klesne na určitou hodnotu. Poté napětí klesá pozvolna, což je dáno časovou konstantou kombinace svodového odporu R_{sh} a difúzní nebo geometrické kapacity. Tento úbytek napětí na sériovém odporu je graficky znázorněn na obr.3.2.



Obr.3.2 Časový průběh napětí po vypnutí proudu

Sériový odpor tedy vypočítáme jako podíl okamžité změny napětí ΔU_0 a velikosti proudu I_F , který byl do článku vnucen vnějším obvodem.

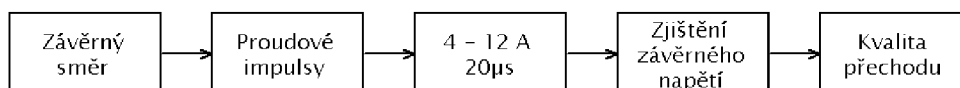
$$R_s = \frac{\Delta U_0}{I_F} \quad (7)$$

V praxi bývá hodnota tohoto odporu u článku 100 x 100 mm přibližně 20 mΩ (2 Ω na 1 cm²), přesto je měření nezbytné pro celkové hodnocení fotovoltaického článku.

3.4. Závěrné napětí přechodu

Při měření závěrného, resp. průrazného napětí U_{br} (Breakdown) zjišťujeme lavinové vlastnosti přechodu. Abychom zabránili tepelnému průrazu (vlivem vysokého proudu), testujeme článek proudovými impulsy pilovitého průběhu o hodnotě 4 – 12 A. Tento proud

nám již zajišťuje dobré hodnocení fotovoltaického článku. Blokové schéma pro měření závěrného napětí je na obr.3.3.

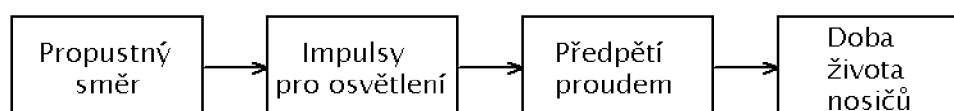


Obr.3.3 Blokové schéma pro měření závěrného napětí

Doba jednoho impulsu je přibližně 20 μ s. U tak krátkého proudového impulsu nevznikají (resp. nestačí se vytvořit) lokální průrazy, při kterých vzniká tzv. mikroplasma [2] [4]. Hodnocení kvality se provádí na základě výsledné závěrné AV charakteristiky. Kvalitní články se vyznačují ostrým zlomem v závěrné větvi AV charakteristiky a strmým nárůstem závěrného proudu. Pokud je nárůst závěrného proudu pozvolný, jedná se o nekvalitní článek. Hodnocení se značí písmeny A – F.

3.5. Doba života minoritních nosičů na odezvu proudovými impulsy

U tohoto měření se nastavuje předpětí článku na 500 - 650 mV tak, aby se zde neuplatňovala bariérová kapacita (záleží na technologii výroby vzorku). Zjišťujeme odezvu článku na proudové impulsy v propustném směru v rozmezí 0 – 5 A.

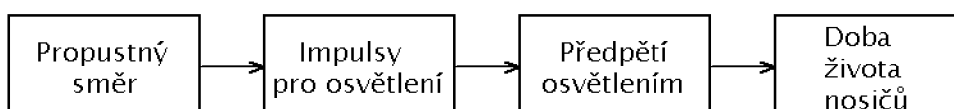


Obr.3.4 Blokové schéma pro zjištění doby života minoritních nosičů

Časová konstanta τ je dána především elektronovou složkou, protože článek je tvořen přechodem PN^+ , kde polovodič typu N je vysoce dotován. Z toho vyplývá, že rekombinace minoritních nosičů probíhá převážně v bázi – v substrátu typu P (přesněji - v kvazineutrální oblasti typu P). Časová konstanta odpovídající době života minoritních nosičů závisí na kvalitě substrátu a může být větší než 500 μ s.

3.6. Doba života minoritních nosičů z odezvy na světelné impulsy

U tohoto měření se udržuje předpětí na článku pomocí 10 x 10 LED osvitového panelu, který dokáže při osvětlení udržet napětí na článku na hodnotě až 500 mV. Díky tomu opět omezíme vliv bariérové kapacity.



Obr.3.5 Blokové schéma pro zjištění doby života minoritních nosičů (pro LED)

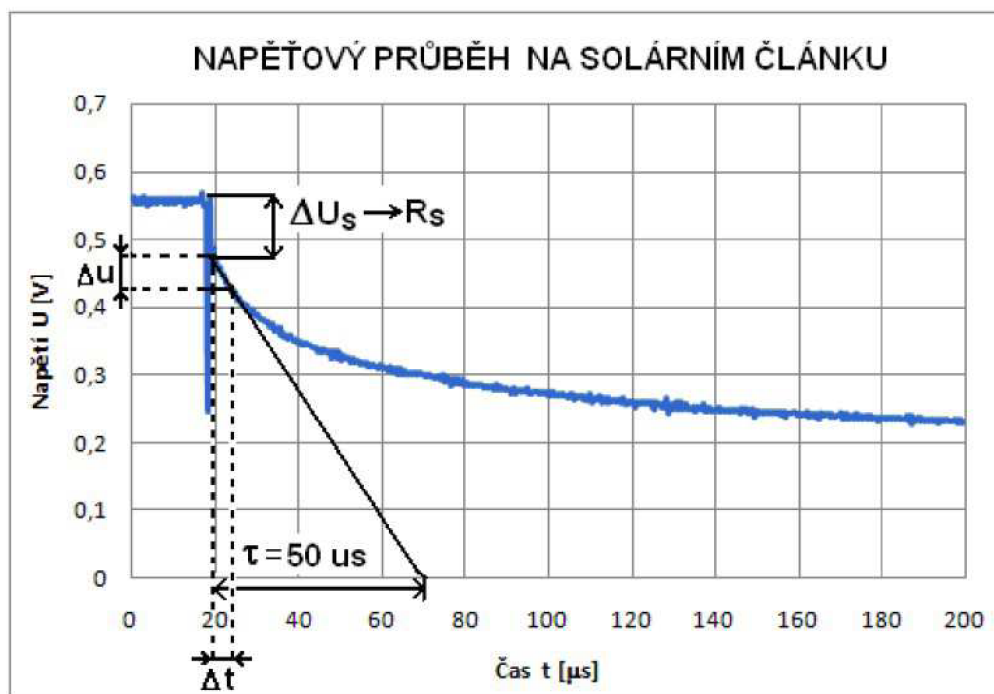
U této metody je doba odezvy na proudové impulsy kratší => $\tau \approx 15 - 20 \mu s$.

4. Experimentální měření solárního článku

Měření se provádí pomocí digitálního USB osciloskopu, zdroje napětí, počítače a testeru [7]. Tester je zařízení, které má tři režimy. První režim slouží k měření v propustném směru pro určování doby života minoritních nosičů a difúzní kapacity. Druhý režim je pro určení bariérové kapacity a svodového odporu pomocí malého napětí obdélníkového průběhu a poslední režim - pro měření závěrného napětí solárního článku pomocí externího zdroje napětí. Samotné měření článku o rozměru 100 x 100 mm se provádí za temna.

4.1. Měření solárního článku v propustném směru

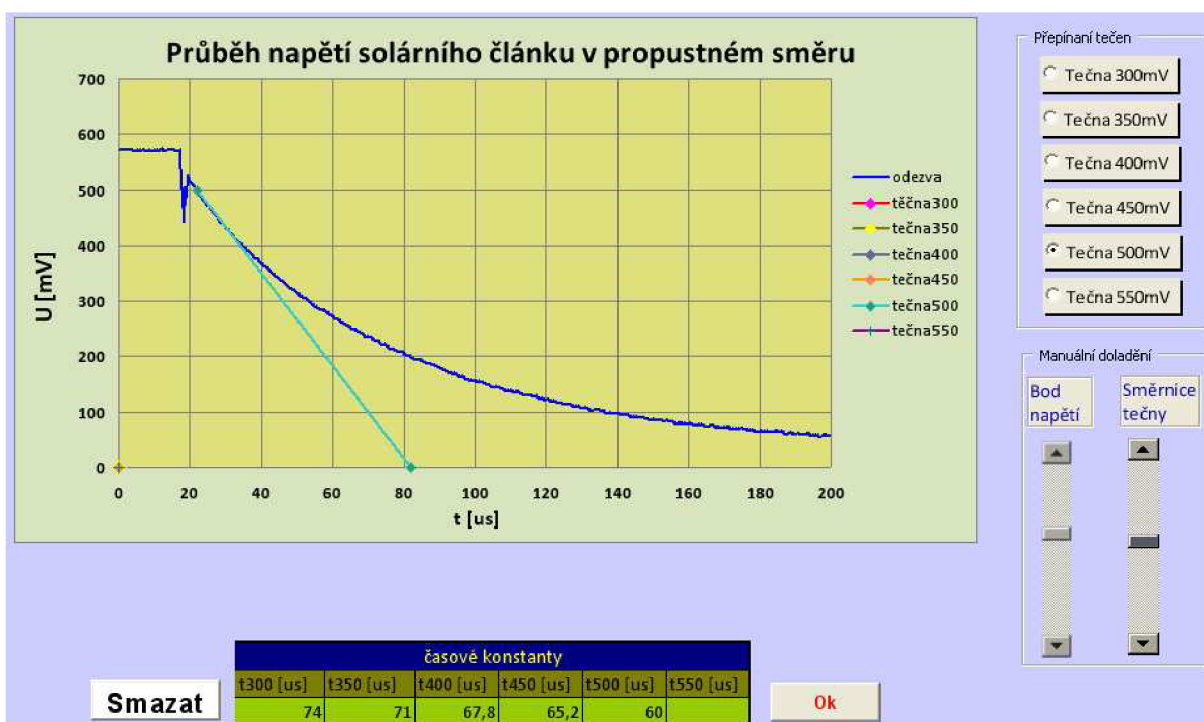
V tomto měření se zjišťuje odezva na sestupnou hranu napěťového impulsu. Jak již bylo v kap. 3.3. naznačeno, sériový odpor R_s zjistíme z okamžitého poklesu napětí napěťového impulsu a vnučeného proudu podle vztahu (7). Na obr.4.1 (převzato z [7]) je naznačeno zjištění potřebného napětí ΔU_s pro výpočet odporu R_s (podobně jako na obr.3.2) a také zjištění časové konstanty vybíjení pomocí tečny v určitém bodě, pomocí které pak lze vypočítat požadovanou difúzní kapacitu.



Obr.4.1 Určení sériového odporu a tečny pomocí dvou blízkých bodů (převzato z [7])

Na obr.4.2 a obr.4.3 jsou odvozené grafy měřených solárních článků z programu určeného ke zpracování a vyhodnocování dat z osciloskopu [7]. Z grafů je dobře vidět průběh vybíjení článků.

Pro každý článek jsou vyhodnoceny jednotlivé časové odezvy τ v rozmezí napětí 300 mV – 550 mV, jak je uvedeno v tabulce. Doba života minoritních nosičů odpovídá napětí cca 500 mV, což je napětí, kdy právě převládá difúzní kapacita C_D , a proto ji lze snadno určit přímo z grafu. Doba života minoritních nosičů je různá – záleží na kvalitě substrátu. U klasických článků se pohybuje kolem 100 μ s.

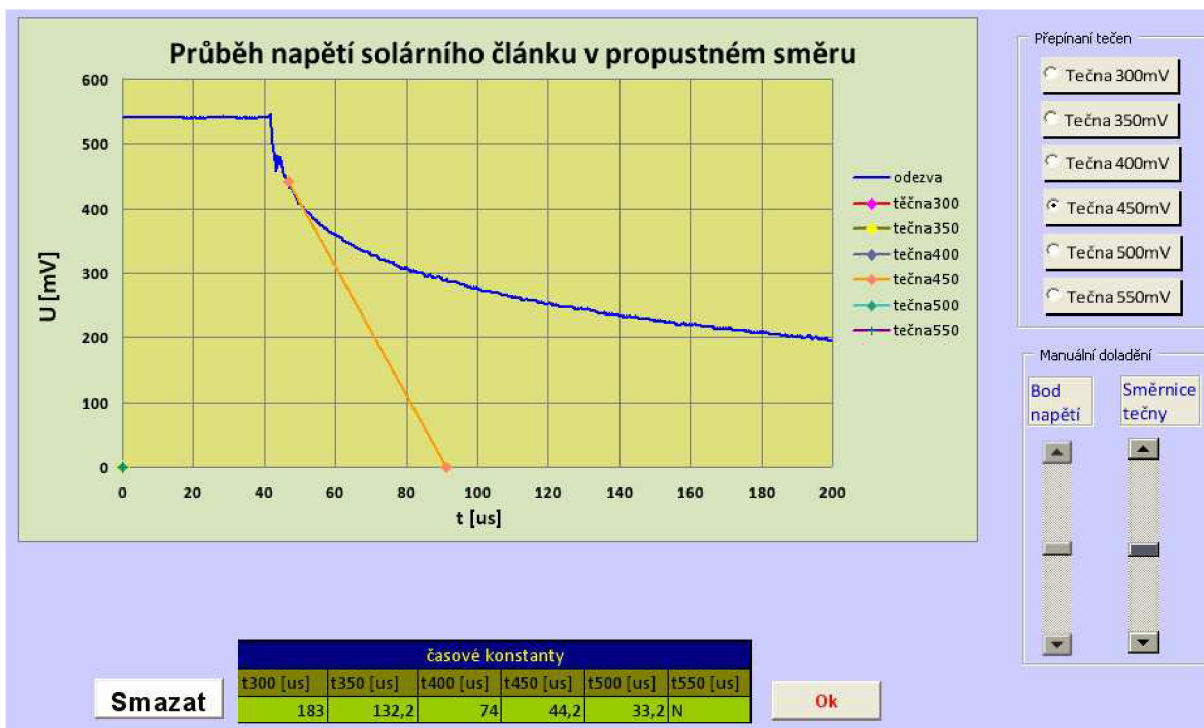


Obr.4.2 Průběh solárního článku 1 v propustném směru

Difúzní kapacita se projevuje u monokrystalických článků při napětí mezi 400 – 500 mV. Použitím vztahu (3) tedy pro článek 1 můžeme vypočítat difúzní kapacitu např. pro proud PN přechodem $I_D = 3$ A a dobu života $\tau = 60$ μ s (pro $U = 500$ mV) následovně:

$$C_D = \frac{I}{U_T} \tau_p = \frac{3}{0,026} \cdot 60 \cdot 10^{-6} = 0,00692 F = 6,92 mF$$

To znamená, že u testovaného článku 1 o rozměru 100 x 100 mm (100 cm²) je difúzní kapacita $C_D = 69,2 \mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}$.



Obr.4.3 Průběh solárního článku 2 v propustném směru

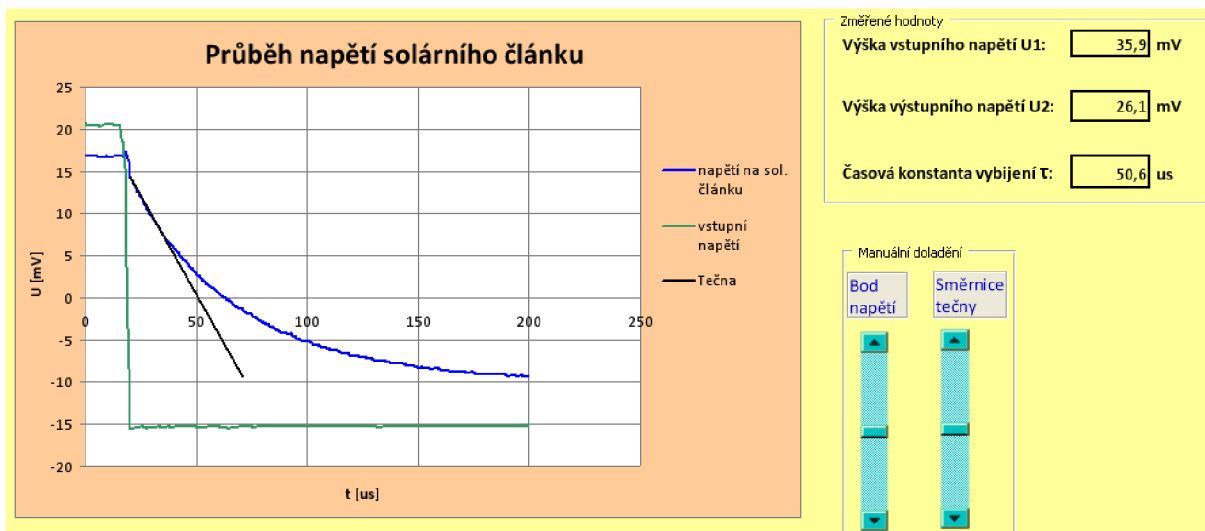
Podobně tak vypočítáme difúzní kapacitu pro článek 2, kdy proud PN přechodem je $I_D = 3 \text{ A}$ a doba života $\tau = 33,2 \mu\text{s}$ (pro $U = 450 \text{ mV}$):

$$C_D = \frac{I}{U_T} \tau_p = \frac{3}{0,026} \cdot 33,2 \cdot 10^{-6} = 0,00383 \text{ F} = 3,83 \text{ mF}$$

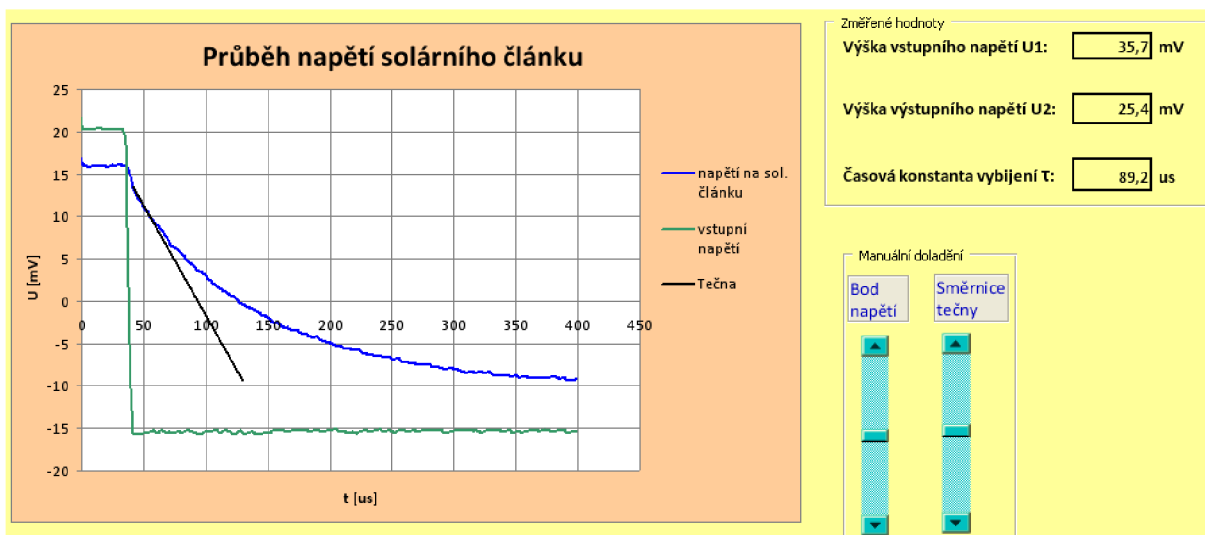
To znamená, že u testovaného článku 2 o rozměru 100 x 100 mm (100cm²) je difúzní kapacita $C_D = 38,3 \mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}$.

4.2. Měření bariérové kapacity

Měření bariérové (geometrické) kapacity se provádí pomocí pulsního vstupního generátoru napětí v řádech desítek mV (tester v režimu 2). Na obr.4.4 a obr.4.5 jsou opět odvozené grafy pro výpočet požadované bariérové kapacity solárního článku.



Obr.4.4 Průběh solárního článku 1 pro výpočet bariérové kapacity



Obr.4.5 Průběh solárního článku 2 pro výpočet bariérové kapacity

Abychom však zjistili kapacitu přechodu např článku 1, potřebujeme vypočítat svodový odpor článku R_{sh} a časovou konstantu vybíjení. Svodový odpor je dán rozdílem vstupního napětí U_1 a výstupního napětí U_2 a proudem, který teče solárním článkem.

Proud vypočítáme pomocí rezistoru o známé hodnotě ($R = 68 \Omega$). Vstupní napětí z generátoru pro článek 1 je $U_1 = 35,9 \text{ mV}$ a napětí na článku je $U_2 = 26,1 \text{ mV}$. Pak svodový odpor vypočítáme podle vztahu :

$$R_{sh} = \frac{R \cdot U_2}{U_1 - U_2} = \frac{68 \cdot 26,1}{35,9 - 26,1} = 181,1 \Omega \quad (8)$$

Výsledný odpor určující časovou odezvu článku je dán paralelní kombinací odporu R , který je zapojen před článkem a právě vypočítaným svodovým odporem R_{sh} . Výsledný odpor pak tedy bude :

$$R_p = \frac{R \cdot R_{sh}}{R + R_{sh}} = \frac{68 \cdot 181,1}{68 + 181,1} = 49,4 \Omega \quad (9)$$

Nyní je možné vypočítat požadovanou geometrickou kapacitu pomocí časové odezvy τ , kterou zjistíme pomocí tečny, podobně jako tomu bylo v kap. 4.1.

$$C_j = \frac{\tau}{R_p} = \frac{50,6 \cdot 10^{-6}}{49,4} = 1,02 \mu F \quad (10)$$

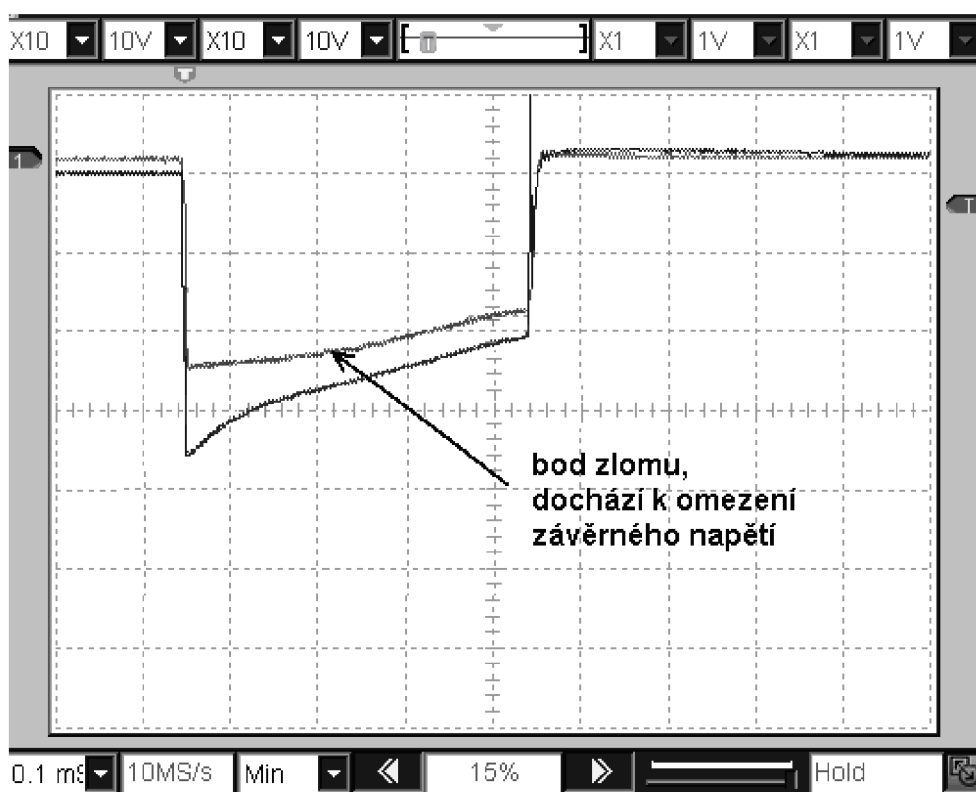
Obdobným způsobem tak vypočítáme parametry článku 2

- svodový odpor $R_{sh} = 167 \Omega$
- celkový odpor $R_p = 48 \Omega$
- bariérová kapacita $C_j = 1,86 \mu F$

4.3. Měření závěrného napětí solárního článku

Měření závěrného napětí článku se provádí rychlými proudovými impulsy (tester v režimu 3), a externím zdrojem napětí s maximálním regulovatelným napětím 60 V. Měření se provádí pomocí osciloskopu, na kterém se porovnávají průběhy napětí na článku a napětí před odporem $R = 1 \Omega$. Tento odpor slouží pro určení proudu procházejícího článkem – rozdíl napětí je roven úbytku napětí na rezistoru R , který je způsoben procházejícím proudem.

Průběh závěrného napětí je na obr. 4.6, který je převzat ze [7] včetně citace.



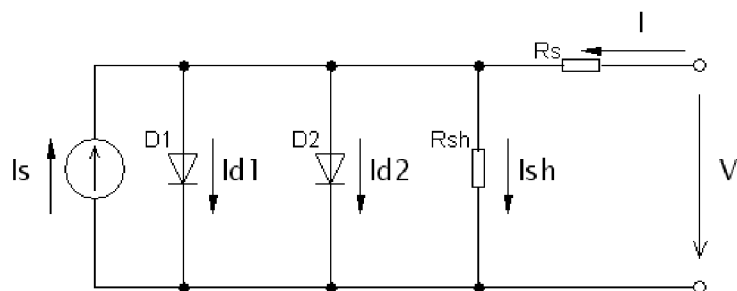
Obr.4.6 Průběh závěrného napětí 26 V

„Omezení napětí článku při průrazu je dobře patrné na zlomu v časovém průběhu napětí na obr.4.6. Při dalším zvyšování napětí zdroje se bod zlomu bude posouvat směrem k delším časům (napětí na fotovoltaickém článku neporoste) zatímco proud se bude prudce zvyšovat.“

5. Metoda měření pomocí dvoudiodového modelu

Jedna z dalších metod pro zjištění parametrů solárních článků je založena na tzv. dvoudiodovém modelu, jehož ekvivalentní zapojení je zobrazeno na obr.5.1. Spočívá na zjišťování parametrů pomocí ampér-voltové charakteristiky, ale v tomto případě za temna.

Na základě neosvětleného solárního článku lze relativně jednoduchou metodou zjistit potřebné parametry k určení účinnosti krystalických křemíkových solárních článků. Uvažujeme-li pouze jednodiodový model, jak již bylo uvedeno (viz. kap.2.), jedná se o jeden PN přechod a parazitní odpory. Pro dokonalejší popis vnitřních dějů je vhodnější dvoudiodový model, který bere v úvahu difúzní a rekombinační mechanismy v PN přechodu, jež mohou ovlivňovat účinnost solárních článků.



Obr.5.1 Ekvivalentní obvod solárního článku (převzato z [8])

Diody D_1 a D_2 představují již zmíněné dva mechanismy. První z nich D_1 popisuje difúzní proces uvnitř solárního článku a druhá dioda D_2 představuje rekombinační centra v PN přechodu. Rekombinační mechanismy se v solárních článcích projevují jako následek krystalických poruch, které se tvoří na přední a zadní ploše solárního článku. Tyto poruchy jsou často způsobeny vysokým dotováním jednotlivých polovodičů. Podle Kirchhoffova zákona z obvodu vyplývá, že platí :

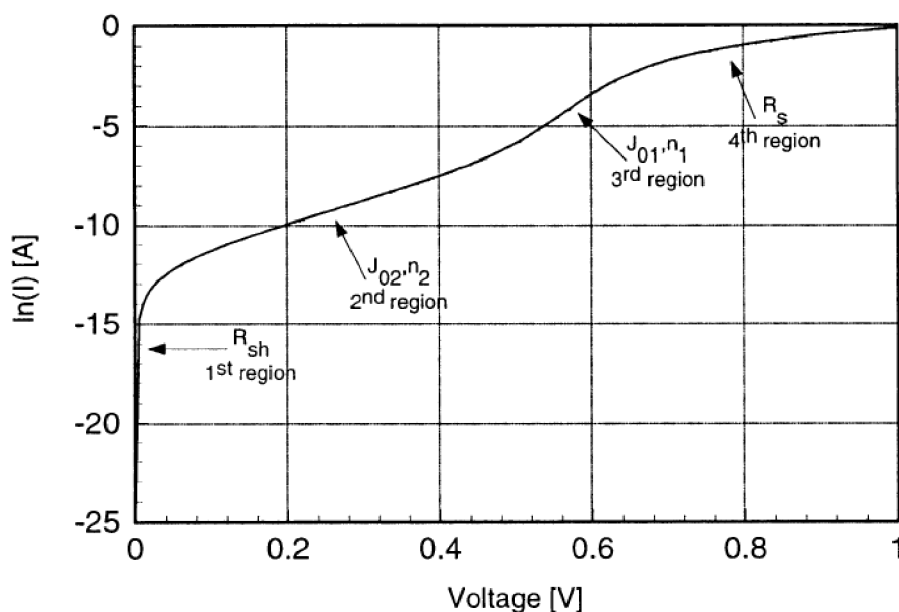
$$I = I_{D1} + I_{D2} + I_{sh} + I_s \quad (11)$$

Jak je patrné z rovnice (11), výsledný proud I je dán součtem všech proudů protékajících jednotlivými prvky (proudy diodami D_1 a D_2 , a seriovým a paralelním rezistorem – I_{sh} a I_s). Jednoduchou úvahou se dají jednotlivé proudy rozvést na výslednou proudovou rovnici (12), která je potřebná ke zjištění parametrů.

$$I = I_{01} \cdot \left[\exp \frac{q(V - I R_S)}{n_1 k T} - 1 \right] + I_{02} \cdot \left[\exp \frac{q(V - I R_S)}{n_2 k T} - 1 \right] + \frac{V - I R_S}{R_{sh}} + I_S \quad (12)$$

První dvě podmínky v rovnici popisují diody D_1 a D_2 , kde I_{01} a I_{02} jsou saturační proudy diod, n_1 a n_2 jsou faktory ideálnosti, q je absolutní hodnota náboje elektronu, V je napětí na přechodu PN, a I_S je vyprodukovaný proud solárního článku. Faktor ideálnosti n je poloempírická konstanta určující odlišnost naměřené a vypočítané (teoretické) A-V charakteristiky. Při jeho použití se deformuje charakteristika diody tak, že odpovídá zkoumané diodě. Faktor ideálnosti $n_1 = 1$ (platí pouze pro difúzní proud [2]) a n_2 by měl být přibližně roven 2. Saturační proud závisí na technologii a použitém materiálu, ale samozřejmě také na teplotě, při které vzniká generace elektron – díra. Jelikož se provádí měření bez okolního osvětlení, můžeme tedy rovnici (12) ještě zjednodušit odstraněním fotoproudu I_S .

Určování parametrů se provádí na základě naměřených dat, z nichž se zhotoví semi-logaritmický A-V graf viz. obr.5.2. Průběh křivky je rozdělen do dvou základních oblastí – oblast nízkého proudu a oblast vysokého proudu. První oblast nám dává informaci o paralelním odporu R_{sh} , saturačním proudu I_{01} a faktoru ideálnosti n . Pomocí druhé oblasti pak určíme charakter difúzního procesu a sériový odpor.



Obr.5.2 Semi-logaritmický graf A – V křivky převzato z [8]

Za předpokladu, že proud procházející článkem za temných podmínek je mnohem větší než saturační proud diod D_1 , D_2 , a zároveň faktor ideálnosti je $n_2 > n_1$, lze druhou podmínku z rovnice (12) zanedbat. Pak bude platit, že :

$$I = I_{01} \cdot \left[\exp \frac{q(V - I R_s)}{n_1 k T} \right] \quad (13)$$

Nyní upravíme vzorec tak, aby nám vznikl přirozený logaritmus :

$$\ln I_{(D1)} = \ln I_{01} + \frac{q(V - I R_s)}{n_1 k T} \Rightarrow \ln I_{(D1)} = \ln I_{01} + K_i \quad (14)$$

Výsledné parametry se získávají aproximací a iterativní metodou pomocí počítače. Zjištěním směrnice přímky (sklon křivky) lze vypočítat pomocí vztahu (14) parametry I_0 a n . Výchozí hodnotu R_{sh} je možné určit přímo z grafu podle sklonu lineární regrese. Další parametry R_s , n_2 a I_{02} je však nutné dopočítat iterační metodou. Výsledná křivka (obr.5.2) je v podstatě superpozicí obou procesů – difúzního i rekombinačního. Pomocí naměřené A-V charakteristiky na základě dvoudiodového modelu lze také popsat chování solárního článku při různých teplotách – teplotní závislost. Z experimentálních měření bylo zjištěno, že při nízkých hodnotách napětí převládají rekombinační procesy, a při vyšších hodnotách napětí převládají difúzní procesy.

Z uvedeného popisu vyplývá, že dvoudiodový model nabízí více informací ohledně mechanismů uvnitř solárních článků.

6. Měření solárních článků firmy Solartec s.r.o.

Součástí této práce je také měření dynamických vlastností a následné ověření kvality solárních článků firmy Solartec s.r.o. z Rožnova pod Radhoštěm, která mi poskytla výrobní sady vzorků článků. Toto měření proběhlo metodou uvedenou v kap. 3. Je nutné podotknout, že některé články byly poškozeny během transportu (zlomené apod.), avšak jak naznačují výsledky měření, na určování kvality to nemělo téměř žádný vliv. Bylo změřeno 8 článků (viz tab.6.1). Rozměry článků byly 150 x 150 mm. Pro dosažení stejné proudové hustoty je tedy nutné do těchto článků dodat přibližně dvojnásobný proud ve srovnání s články, jejichž testování bylo popsáno v kapitole 4.

6.1. Časová odezva solárních článků – bariérová kapacita a svodový odpor

Jako první byly měřeny časové odezvy solárního článku na vstupní obdelníkový průběh, který byl nastaven na velikost $U_1 = 80$ mV. Z těchto výsledků pak byla vypočtena podle vztahu (8) a (10) bariérová kapacita C_j a svodový odpor R_{sh} (viz. tab.6.1).

vzorek	U_1 [mV]	U_2 [mV]	τ [μ s]	R_{sh} [Ω]	R_p [Ω]	C_j [μ F]
W-1	80	10	20	9,7	8,5	2,35
3150-15	80	5	35	4,53	4,25	8,23
3150-14	80	14	70	14,4	11,9	5,88
3150-7	80	8	45	7,5	6,8	6,61
3147-2	80	10	55	9,71	8,5	6,47
3149-25	80	16	100	17	13,6	7,35
3147-8	80	13	75	13,2	11,05	6,79
3147-15	80	40	300	68	34	8,82

Tab 6.1 Naměřené hodnoty časové odezvy a bariérové kapacity

kde : U_1 [mV] - vstupní napět'ový impuls
 U_2 [mV] - napět'ová odezva (výstupní napětí článku)
 τ [μ s] - časová odezva sestupné hrany napět'ového impulsu

- R_{sh} [Ω] - svodový odpor
- R_p [Ω] - celkový odpor (paralelní zapojení svodového odporu s odporem měřicího přístroje)
- C_j [μF] - vypočítaná geometrická kapacita

Z tabulky je zřejmé, že geometrická kapacita všech vzorků, vyjma prvního, se pohybuje v rozmezí 5,88 μF až 8,82 μF . První vzorek v tabulce (W-1), který je zařazen z jiné výrobní sady článků, má hodnotu geometrické kapacity $C_j = 2,35 \mu\text{F}$. Takto nízká hodnota kapacity svědčí o jiné výrobní technologii a především použití méně dotovaného substrátu. Menší kapacita znamená větší šířku přechodu a podstatně větší závěrné napětí.

6.2. Časová odezva na sestupnou hranu napěťového impulsu

V tabulce 6.2 jsou pak uvedeny naměřené hodnoty časové odezvy na sestupnou hranu napěťového impulsu. Z hodnot uvedených v tabulce lze také vypočítat difúzní kapacitu.

vzorek	τ_{300} [μs]	τ_{400} [μs]	τ_{500} [μs]	τ_{550} [μs]	τ_{520} [μs]	U_z [V]
W-1	N	120	120	130	N	N
3150-15	45	47	58	75	N	28
3150-14	N	100	105	N	145	32
3150-7	48	60	84	N	120	31
3147-2	75	75	88	N	150	32
3149-25	150	150	160	N	160	29
3147-8	110	110	125	N	150	30
3147-15	260	N	145	N	135	30

Tab 6.2 Časové odezvy a závěrné napětí

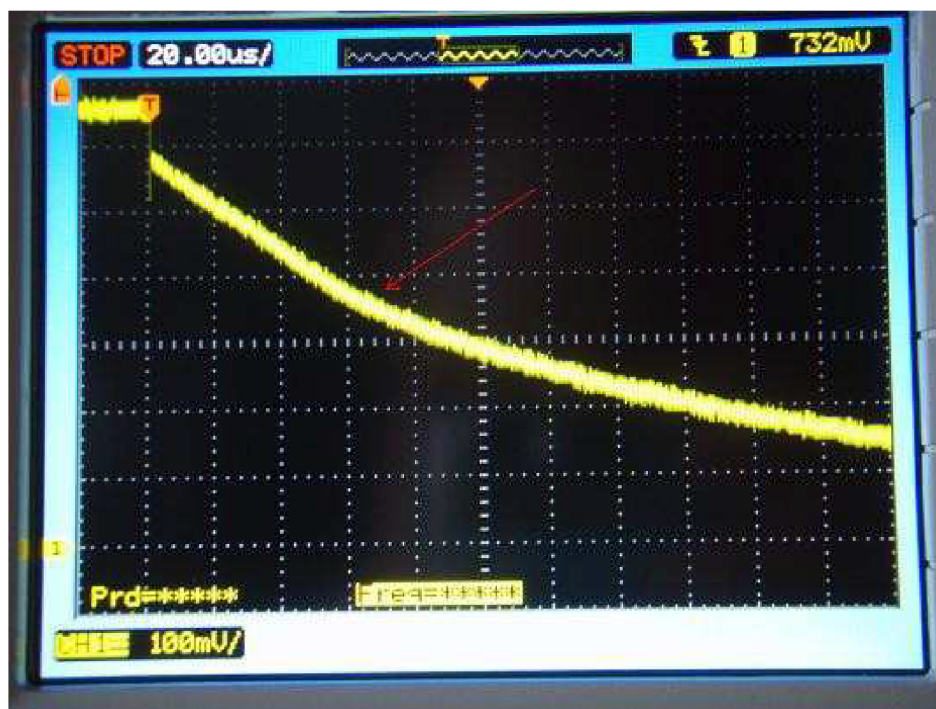
- τ_{300} [μs] - časová odezva na setupnou hranu o velikosti 300 mV
- τ_{400} [μs] - časová odezva na setupnou hranu o velikosti 400 mV
- τ_{500} [μs] - časová odezva na setupnou hranu o velikosti 500 mV
- τ_{550} [μs] - časová odezva na setupnou hranu o velikosti 550 mV

τ_{520} [μs] - časová odezva na setupnou hranu o velikosti 520 mV

Na obr.6.1 je zobrazen jeden z průběhů napěťové odezvy článku na napěťový impuls - přibližně $U = 650$ mV, na kterém lze zřetelně pozorovat přechod (zlom) difúzní kapacity na geometrickou kapacitu (červená šipka). V podstatě tento průběh koresponduje s obr.2.2, jenž popisuje, ve kterém okamžiku převládají dané kapacity, a ve kterém okamžiku také dochází ke změně časové konstanty (při napětí $U_{DJ} = 350$ mV).

Na obrázku lze také pozorovat úbytek na sériovém odporu, který zde představuje odpor přívodů solárního článku. Ze vztahu (7) je hodnota sériového odporu přibližně $R_S = 20$ m Ω .

U článku 3147-2 bylo zjištěno zvýšení sériového odporu téměř na dvojnásobek jeho původní hodnoty, při zvyšování vstupního napětí na maximum, avšak při druhém měření se tak vysoká hodnota již neprojevila. Tato skutečnost mohla být způsobena chybou měření či špatným nakontaktováním solárního článku.



Obr.6.1 průběh doby života minoritních nosičů

6.3. Závěrné vlastnosti článků

Jako poslední krok měření bylo měření závěrného napětí. Ve výsledku, kromě prvního článku, měly ostatní články velmi dobré závěrné vlastnosti. Závěrné napětí se pohybovalo v rozmezí 28 V až 32 V se strmým spádem, jak naznačuje AV křivka (obr.6.2).

Právě tento graf je zajímavý svým srovnáním kvalitního článku a článku W-1 s velmi špatnými závěrnými vlastnostmi. Zde narůstal závěrný proud do vysokých hodnot již od napětí cca 4 V. Skutečné závěrné napětí PN přechodu tohoto článku proto není možné určit. Z hodnoty poměrně malé bariérové kapacity (svědčící o velké šířce přechodu) však lze usoudit, že závěrné napětí přechodu článku W-1 bude poměrně velké.



Obr.6.2 Závěrné napětí – AV charakteristiky

Je také nutné podotknout, že měření bylo prováděno při pokojové teplotě (cca 22°C), která může pohybovat pracovním bodem článku. Teplota článků má značný vliv na veškeré měřené veličiny. Z experimentálních měření bylo zjištěno, že se zvyšující se teplotou se :

- zvětšuje proud protékající článkem o 0,05 % / °C (v režimu na krátko)
- snižuje paralelní odpor článku o 0,7 % / °C

- zvyšuje sériový odpor článku o 0,32 % / °C
- snižuje napětí naprázdno o 0,38 % / °C

6.4. Zhodnocení testu článků Solartec

Z výsledků testů vyplývá, že z hlediska parametrů naměřených pomocí dynamického testování jsou vzorky celé série přibližně shodné, což svědčí o dobré reprodukovatelnosti celého výrobního procesu. Výrazná odchylka je pouze v hodnotě svodového odporu, který vychází výrazně menší než je u tohoto typu článku obvyklé.

Výsledná účinnost testovaných solárních článků, kterou udává výrobce (15 – 16%) v podstatě odpovídá naměřeným výsledkům. Z experimentálního hlediska je však zajímavé také to, že během měření bylo zjištěno, že relativně vysoká účinnost platí i pro vzorky, u kterých byly naměřeny některé parametry horší.

Zde je nutné uvážit, že účinnost testovaných článků je mnohem menší než účinnost teoretická. Z tohoto hlediska lze usoudit, že při účinnosti článků kolem 15 – 16 % se na poklesu účinnosti podílí řada faktorů a při jejich určitých kombinacích nemusí mít doba života minoritních nosičů v substrátu, svodový odpor, ba ani lavinové vlastnosti přechodu článku zásadní vliv na celkovou účinnost článku.

To také znamená, že pro dosažení účinnosti článků přes 20 % je třeba velmi pečlivého vyladění celého výrobního procesu. Zásadní vliv přitom může mít technologie povrchové pasivace článku, ovlivňující povrchovou rekombinaci, která se při zde uvedených testech příliš výrazně neprojevuje.

Jsou tu však i negativní vlivy na přesnost měření, které mohou být způsobeny nedokonalým čtyřbodovým kontaktováním.

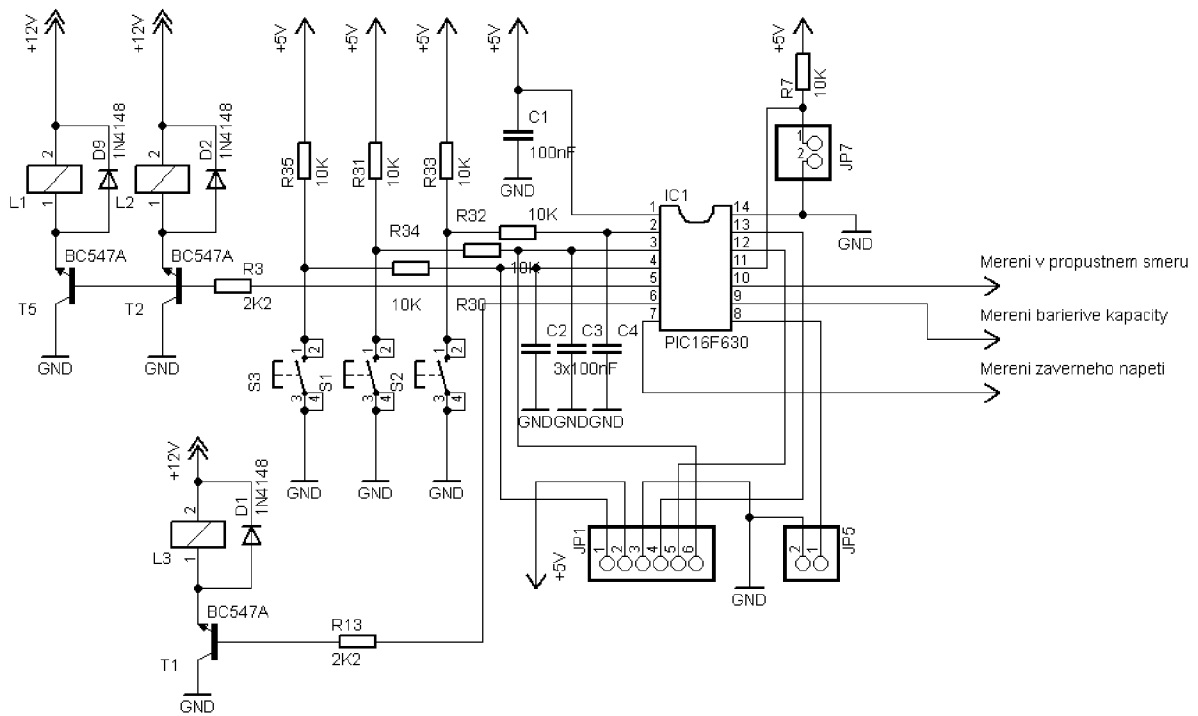
7. Dynamické testování solárních článků buzených proudovými impulsy s proměnnou frekvencí

Dalším experimentem této diplomové práce bylo zjistit chování solárních článků při proměnné frekvenci budících proudových impulsů, resp. změnu doby pulsu a jejich četnost. Podstatou tohoto experimentu je zjednodušení měření doby života minoritních nosičů pomocí modifikace budícího signálu, resp. testeru pro dynamické testování solárních článků.

7.1. Modifikace testeru pro řízení proměnné frekvence proudových pulsů

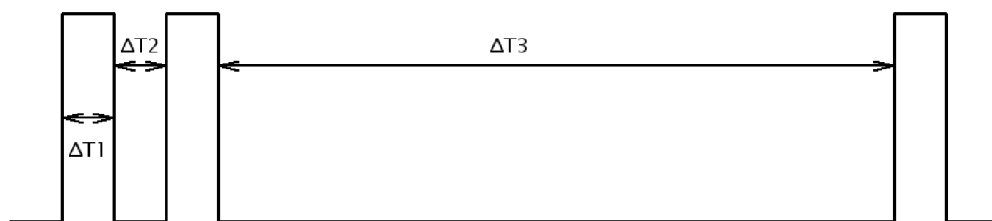
Modifikace spočívá v úpravě stávajícího návrhu obvodu testeru. Jedná se v podstatě o vhodnou implementaci ovládacích tlačítek pro řízení výstupního budícího signálu, s čímž je také spojena úprava realizovaného obvodu na DPS. Ta souvisí také s úpravou programu pro mikrokontrolér PIC16F630.

Ovládací tlačítka pro změnu časové konstanty pulsů a periody (S1 a S2) byla zapojena na vstup mikrokontroléru (PIN RA4 a RA5) namísto externího oscilátoru (mikrokontrolér je řízen vnitřím oscilátorem). Poslední, třetí tlačítko S3 bylo zapojeno na volný vstupně/výstupní PIN RA3. Veškeré vstupy mikrokontroléru pro ovládací tlačítka byly ošetřeny rezistory 10 k Ω a jsou řízeny log.0. Pro zamezení nežádoucích zákmitů byly použity mikrospínače TM095 [13], viz. obr.7.1, a také keramické kondenzátory $C = 100$ nF. Propojení mikrospínačů s DPS bylo provedeno pomocí miniaturních počítačových pinů. Výsledné zapojení je zobrazeno na obr.7.1.



Obr.7.1 Schéma modifikovaného obvodu

Jak již bylo uvedeno, cílem tohoto zapojení byla úprava výstupního budicího signálu z testeru, čímž bylo dosaženo jednoduššího měření časové konstanty τ (doby života minoritních nosičů).



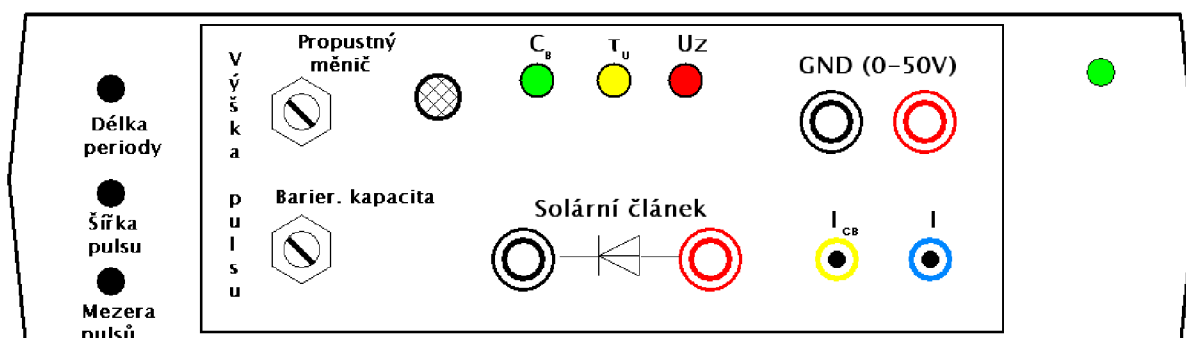
Obr.7.2 Schéma modifikovaného obvodu

Na obr.7.2 je zobrazen modifikovaný budicí signál testeru. Vzhledem k různým časovým konstantám solárních článků jsou časové konstanty ΔT nastavitelné v pěti krocích, které se mění v cyklu. Délka celkové periody je 1s. Parametry ΔT_1 a ΔT_2 jsou nastavitelné

v rozmezí 10 μ s až 64 μ s, což je dostačující pro správné vyhodnocování doby života minoritních nosičů.

7.1.1. Realizace panelu testeru

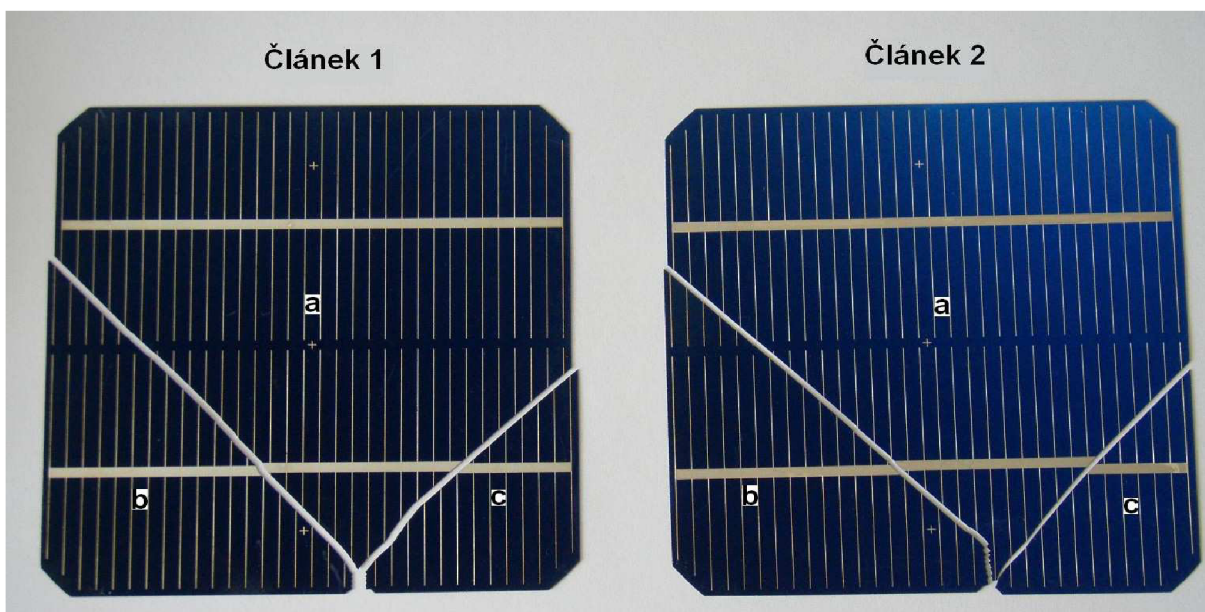
S modifikací návrhu testeru souvisí také rozvržení tlačítek na přístrojovém panelu testeru, který je zobrazen na obr.7.3.



Obr.7.3 Přístrojový panel testeru

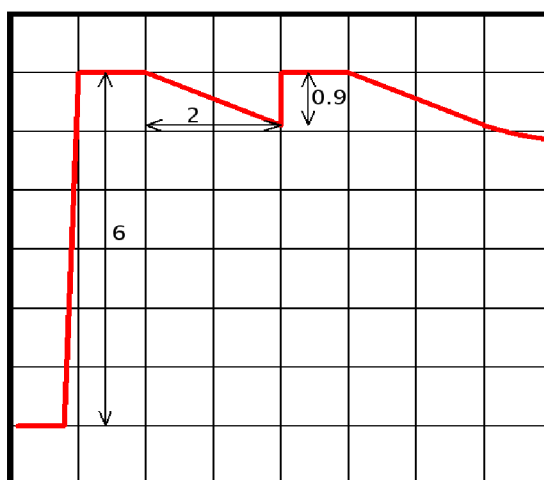
7.2. Měření solárních článků pomocí upraveného budicího signálu

Experimentální měření bylo prováděno na dvou poškozených solárních článcích. Rozsah poškození každého článku spočíval v rozlomení na tři části, které jsou označeny písmenky *a*, *b* a *c* (viz. obr.7.4). Samotné zjištění (odečtení) časové konstanty τ pak popisuje obr.7.5.



Obr.7.4 Testovací články

Postupným zkracováním doby mezi pulsy je zkracována vybíjecí fáze solárního článku až do doby, kdy je tato vybíjecí část lineární. Názorný příklad je zobrazen na obr.7.5, který odpovídá článku 1 – b.



Obr.7.5 Grafické znázornění průběhu vybíjení solárního článku

Časovou konstantu τ získáme jednoduchým výpočtem $\tau = \frac{u_1}{u_2} \cdot t$, kde u_1 a u_2 je počet

dílků na osciloskopu ve vertikálním směru a t doba lineární časové konstanty – v tomto případě t odpovídá při rozsahu osciloskopu 5 $\mu\text{s}/\text{dílek} \Rightarrow t = 10 \mu\text{s}$.

Výsledná doba života minoritních nosičů je tedy :

$$\tau = \frac{u_1}{u_2} \cdot t = \frac{6}{0,9} \cdot 10 = 67 \mu\text{s} \quad (15)$$

Podstatou je tedy přesnější zjištění doby τ . Reálný průběh odezvy solárního článku je zobrazen na obr.7.6.



Obr.7.6 Reálný průběh vybíjení solárního článku

Z naměřených výsledků uvedených v tab.7.1 je zřejmé, že článek 1 (díly a a b) má relativně dobré hodnoty časové konstanty τ . Odchylka τ pro článek 1c může být způsobena poškozením článku (malý svodový odpor na hraně zlomu).

U článku 2 byly navíc naměřeny doby života τ i pro napětí 500 mV, kdy již převládá difúzní kapacita. Opět je vidět, že článek 2a má menší dobu τ než díly b a c , což může být způsobeno stejnou příčinou jako u článku 1.

Napětí na článku	Článek 1			Článek 2		
	a	b	c	a	b	c
300 mV	75 μ s	67 μ s	30 μ s	106 μ s	205 μ s	200 μ s
500 mV				89 μ s	160 μ s	143 μ s

Tab.7.1 Naměřené časové konstanty τ

8. Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo seznámení se s metodou dynamického testování solárních fotovoltaických článků a s metodikou hodnocení fotovoltaických článků na základě dvoudiodového modelu. Tyto metody byly popsány a ověřeny na dodané sérii krystalických křemíkových fotovoltaických článků.

V teoretickém úvodu práce je nejprve vysvětlen princip výroby elektrické energie pomocí fotovoltaických článků a jsou stručně popsány jevy uplatňující se v PN přechodech. V následujícím přehledu jsou krátce popsány některé typy fotovoltaických článků, včetně jejich stručné charakteristiky, využití a technologie výroby. V části věnované dynamickému testování je popsána podstata metody, metodika měření a je uveden stručný popis dynamického testeru.

V praktické části práce byly provedeny následující experimenty:

- 1) Metodika pro hodnocení vlastností fotovoltaických článků pomocí dynamického testování byla ověřena při měření dvou křemíkových článků na monokrystalických substrátech typu P. Rozměry článků byly 100 x 100 mm. Měření bylo provedeno pomocí dynamického testeru [7], osciloskopu a počítače. Reprodukovatelnost naměřených hodnot doby života minoritních nosičů, bariérové kapacity, svodového odporu a závěrného napětí článku byla ověřena opakovaným měřením obou článků.
- 2) Ve spolupráci s firmou Solartec s.r.o. bylo provedeno měření na dodané sadě vzorků solárních článků na monokrystalických substrátech typu P. Rozměry článků byly již dle současného standardu 150 x 150 mm. Naměřené hodnoty byly porovnány s článkem z jiné výrobní série. Z výsledků testů vyplývá, že z hlediska parametrů naměřených pomocí dynamického testování, jsou vzorky celé série přibližně shodné, což svědčí o dobré reprodukovatelnosti výrobního procesu. Výrazná odchylka je pouze v hodnotě svodového odporu, který vychází výrazně menší než je u tohoto typu článku obvyklé. Také tato odchylka je u všech vzorků přibližně stejná.
- 3) Pro porovnání je popsána metodika odhadu parametrů fotovoltaického článku pomocí dvoudiodového modelu. Tento model umožňuje odhad sériového i paralelního odporu a umožňuje také ocenit vliv rekombinačních mechanismů. Vyhodnocení však vyžaduje využití výpočetní techniky pro aproximační a iterační postupy, může být poměrně zdlouhavé a může být také zatíženo značnou chybou. Z diodového modelu samozřejmě nelze určit závěrné napětí článku.

4) Byla provedena modifikace dynamického testeru pro měření časové konstanty odpovídající difúzní kapacitě (a době života minoritních nosičů v substrátu) pomocí proudových impulsů s proměnnou frekvencí. Od zavedení tohoto způsobu měření se očekává zjednodušené vyhodnocení měření doby života minoritních nosičů.

5) Metodika měření pomocí proudových impulsů s proměnnou frekvencí byla ověřena na opakovaném měření jednotlivých částí dvou křemíkových článků na monokrystalickém substrátu typu P rozlomených na tři nestejně díly. Při zlomu vznikly části s různým stupněm poškození, a tím i s různou dobou života minoritních nosičů. Rozdílné plochy jednotlivých článků byly potřebné pro zhodnocení vlastností testeru při různé úrovni budicího proudu.

Závěrem bych rád poděkoval panu Ing. Kamilu Hanákovi za pomoc a poskytnutí cenných informací v průběhu testování a společnosti Solartec s.r.o. za dodání série vzorků pro měření.

9. Seznam použité literatury

- [1] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. *FYZIKA – Moderní fyzika*. VUTIUM, Brno / Prometheus, Praha 2006, ISBN 80-214-1868-9
- [2] MUSIL, V., BRZOBOHATÝ, J., BOUŠEK, J., PRCHALOVÁ, I. *ELEKTRONICKÉ SOUČÁSTKY*. VUTIUM, Brno 2005, ISBN 80-214-2627-6
- [3] BOUŠEK, J., PORUBA, A.: "Testing of solar cells using fast transients", Proceedings 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, 2006, pp 253 – 258
- [4] FRANK, H. *FYZIKA A TECHNIKA POLOVODIČŮ*. SNTL, Praha 1990, ISBN 80-03-00401-2
- [5] FOTOVOLTAIKA *Fotovoltaika aneb získávání elektřiny ze slunce* [on-line]. [cit. 18. dubna 2010]. Dostupné z WWW : <<http://fotovoltaika.falconis.cz>>
- [6] ELEKTRO *Odborný časopis pro elektrotechniku* [on-line]. [cit. 18. dubna 2010]. Dostupné z WWW : <<http://www.odbornecasopisy.cz>>
- [7] HANÁK, K. "Pracoviště pro dynamické testování solárních článků", Diplomová práce, FEKT VUT v Brno 2009
- [8] R. HUSSEIN, D. BORCHET, G. GRABOSCH, W. R. FAHRNER: „Dark I–V–T measurements and characteristics of (n) a-Si/(p) heterojunction solar cells“ *Solar Energy Materials & Solar Cells* 69 (2001) 123–129
- [9] EREES Q.B. MACABEBE, E. ERNEST VAN DYK: „Parameter extraction from dark current–voltage characteristics of solar cells“ *South African Journal of Science* 104 (2008)
- [10] ING. RADIM BAŘINKA A SOLARTEC S.R.O. *PROMĚŘENÍ DEFEKTŮ RŮZNÝMI DOSTUPNÝMI METODAMI*. Rožnov pod Radhoštěm 2006.
- [11] Elektronika, GM ELEKTRONIC. *Sortiment nabídky GM elektronik* [on-line]. [cit. 11. dubna 2009]. Dostupné z WWW : <<http://www.gme.cz>>
- [12] MICROCHIP PIC16F630, *Datasheet Microchip* [on-line]. [cit. 11. dubna 2011]. Dostupné z WWW : <<http://www.microchip.com>>
- [13] Elektronika, ZDANĚK KRČMÁŘ. *Sortiment nabídky EZK* [on-line]. [cit. 10. dubna 2011]. Dostupné z WWW : <<http://www.ezk.cz>>

- [14] Solartec s. r. o. Rožnov pod Radhoštěm [on-line].
[cit. 11. dubna 2011]. Dostupné z WWW : <<http://www.solartec.cz>>
- [15] LIBRA, M., POULEK, V. *FOTOVOLTAIKA – Teorie i praxe využití solární energie*.
ILSA, Praha 2009, ISBN 978-80-904311-0-2